IGM88RT-107-708-G
CNRC 28679

LES TECHNIQUES DE MOULAGE PAR COMPRESSION ET PAR AUTOCLAVE DES THERMODUCISSABLES ET DES THERMOPLASTIQUES

Par: PIERRE LARIVIERE

TECHNIQUE DES PLASTIQUES PIERRE LARIVIERE INC.
110 Du Marché, Roxton Falls, Qc J0H 1E0

Premier trimestre, 1988

"Technique des Plastiques Pierre Larivière Inc." considère que les informations publiées dans ce livre sont exactes et précises, mais n'assume aucune responsabilité ou obligation vis-à-vis toutes conséquences que pourraient entraîner leur utilisation.

A la connaissance de "Technique des Plastiques Pierre Larivière Inc." ce document n'usurpe aucun droit relatif à des brevets. C'est la responsabilité de l'utilisateur de faire les vérifications pour s'assurer que son produit ou sa technique respectent tous les droits de brevets qui pourraient s'appliquer.

TABLE DES MATIERES

DESC. GENERALE DU PROCEDE DE MOULAGE PAR COMPRESSION... 14

Historique..... 14
Mode d'opération..... 15
Possibilités et limites du procédé..... 17
Equipement pour le moulage par compression..... 18
Presse à moulage..... 18
Equipements périphériques..... 18
Moules pour le moulage par compression..... 19
Configuration générale..... 19
Pincement..... 19
Chauffage..... 19
Ejection des pièces..... 19
Contrôle..... 20
Pression..... 20
Vitesse..... 20
Temps..... 20
Température..... 20
Matériaux pour la compression..... 21
Allyl..... 21
Aminoplastes..... 21
Epoxy..... 21
Phénoplastes..... 22
Polyesters..... 22
Silicones..... 22
Polyimides thermoducissables..... 22

DOMAINE D'APPLICATION..... 23

Règles de design..... 23
Angle de moulage..... 23
Rayons de raccord..... 23
Epaisseur des murs..... 23
Renforts et membrures intégrés..... 23
Inserts..... 23
Champs d'application..... 24
Composantes électriques..... 24
Secteur automobile..... 24
Appareil industriels et domestiques..... 24

VARIANTES DU PROCEDE DE MOULAGE PAR COMPRESSION..... 25

Compression à basse pression avec résine liquide.. 25
Compression haute pression avec résine liquide.... 27
Compression transfert..... 29

EQUIPEMENT POUR LE MOULAGE PAR COMPRESSION..... 31

Presses..... 31
Capacité et pression..... 31
Structure et conception du chassis..... 33
Presses à colonnes..... 33
Presse à cadre..... 33
Mode de mouvement des plateaux..... 33
Précission des mouvements du plateau..... 35
Contrôles et avertissement des séquences..... 35
Pression..... 36
Vitesse..... 36
Temps des séquences du cycle..... 37
Température du moule..... 37
Equipements auxiliaires..... 38
Compoundeuse à BMC et machine à SMC..... 38
Pastilleuse..... 40
Four à préchauffage..... 40
Equipement de découpe et d'ébarbage..... 41
Système de chargement et de déchargement..... 41
Système SMC "in-mould coating..... 41
Enduits liquides..... 42
Enduit en poudre..... 42

ELEMENTS DE CONTROLE DU PROCEDE..... 43

Facteurs reliés au contrôle du cycle de moulage... 43
Patron de charge..... 43
Temps de cycle..... 45
Température de moulage..... 45
Détermination de la vitesse..... 45
Pression de moulage..... 45

GUIDE DE CORRECTION DES DEFAUTS SUR LE SMC..... 46

Facteur de contrôle reliés au matériel..... 47
Facteurs de contrôles reliés au produit moulé..... 48
Qualité des surface..... 48
Déformation de la pièce..... 48
Aspect structural..... 48

MOULES POUR LE MOULAGE PAR COMPRESSION..... 50

Configuration générale..... 50
Moules positifs..... 51
Moules semi-positifs..... 51
Moules à couteau (flash mould)..... 51
Matériaux pour les moules..... 53
Construction..... 53
Fini de surface..... 53
Règles de design et standards..... 54
Pincement (pich off)..... 54
Démoulage..... 54
Chauffage..... 54

MATERIAUX THERMODURCISSABLE..... 55

Allyl..... 55
Aminoplastes..... 56
Urée-formaldéhyde..... 56
Mélamine formaldéhyde..... 56
Epoxy..... 57
Phénoliques..... 58
Polyester..... 59
Mat/résine liquide..... 60
Bmc..... 60
Smc..... 61
Hmc..... 62
Xmc..... 62
Tmc..... 62
Polyester de type alkyd..... 63
Silicone..... 63
Polyimide..... 63
FICHES DES MATERIAUX..... 64

REGLES DE DESIGN..... 73

Mouvement de la matière 73
Epaisseur des pièces moulees..... 75
Angles de démoulage..... 74
Rayons de raccord..... 74
Nervures et membrures..... 75
Bordures des pièces..... 75
Bossage..... 76
Inserts..... 76
Contre dépouille et ouvertures..... 77

Applications types..... 78
Pare-choc pour automobile..... 78
Roue d'automobile en SMC..... 78
Pièces de carosserie..... 78
Sièges moulés..... 79
Composantes électriques..... 79
Applications domestiques..... 79
Produits récréatifs..... 79

ANALYSE ET SIMULATION DU MOULAGE PAR COMPRESSION..... 80

Ecoulement VS la matière à mouler..... 80
Composition du mélange..... 81
Maturation de la matière..... 81
Ecoulement VS la procédure de moulage..... 82
Patron de charge..... 82
Vitesse de fermeture..... 82
Ecoulement VS le moule et la presse..... 83
Moule..... 83
Presse..... 84

POTENTIEL DE LA TECHNIQUE DE MOULAGE PAR COMPRESSION... 85

Potentiels des procédés..... 86
Elargissement de l'utilisation SMC et BMC.... 86
Mise au point des nouveaux materiaux SMC..... 86
Amélioration des techniques d'injection ZMC.. 87
Mise au point nouv. comp. thermodurcissables. 87

DESCRIPTION GENERALE DU PROCEDE..... 89

Historique..... 89
Procédure de moulage..... 90
Possibilités et limites du procédé..... 92
Equipements pour le moulage par autoclave..... 93
Equipement de bagging..... 93
Equipement de cuisson..... 93
Moules..... 94
Contrôles..... 94
Matériaux..... 95
Matrices..... 95
Epoxy..... 95
Bismaleimide..... 95
Polyimide..... 95
Phénolique..... 95
Polyester..... 95

Renfort..... 96
Verre..... 96
Aramide..... 96
Carbone..... 96
Graphite..... 96
Baron..... 96
Plyéthylene linéaire..... 96

DOMAINE D'APPLICATION..... 97

Règles de design..... 97
Champs d'application..... 98

VARIANTES DU PROCEDE..... 99

Vacuum bag molding (polymérisation en étuve)..... 99
Pressure bag moulding.....101
Pressure bag.....101
Presse clave.....101
Hydroclave.....103
Vacuum bag avec chauffage par le laminé.....103

EQUIPEMENT POUR LE MOULAGE PAR AUTOCLAVE.....104

Matériel pour le bagging.....104
Membrane flexible (vacuum bag).....104
Feutre de drainage (bleeder et breather).....105
Film de démoulage (release film).....105
Tissu poreux (release fabric).....105
Tissu d'arrachage (peel ply).....105
Mastic (seallant).....106
Cale détanchéité (dam).....106
Plaque de compression (caule plate).....106
Démoulant liquide (release agent).....106
Ruban adhésif (pressure sensitive tape).....106
Acessoires divers.....106
Appareils de cuisson et de pression.....108
Pompe à vide.....108
Etuves.....108
Presse-clave.....108
Autoclaves.....109

CONTROLE DES MATERIAUX ET DES PRODUITS.....110

Contrôle des matériaux.....110
Composition du prepreg.....110
Viellissement de la matière en entreposage...110
"Aspect collant" (tack contrôls).....111
Niveau de fluage (flow contrôl).....111
Temps de gel (gel time).....111
Contrôles des produits finis.....112
Test par ultrason.....112
Test par radiographie.....112
Emission accoustique.....112
Analyses thermiques.....113
Contrôle de la dureté du laminé.....113
Inspection visuelle.....113
Importance du contrôle dans production..113

MOULES POUR MOULAGE PAR AUTOCLAVE.....114

Moules en acier.....114
Moules en aluminium.....114
Moules en nickel.....116
moules en matériaux composites.....116

MATERIAUX POUR MOULAGE EN AUTOCLAVE.....117

Les prepregs.....117
Résine époxy.....118
Caractéristiques.....118
Types de résines.....119
Biphénol à (DGEBA).....119
Aliphatique et cycloaliphatique.....119
Epoxys novalacs.....119
Epoxys bormines.....119
Types de durcisseurs.....120
Amines aliphatiques.....120
Amines aromatiques.....120
Anydrides d'acides.....120
Acides de lewis.....120
Application.....120
Résines polyimides.....121
Polyimide par polycondensation.....121
Polyamide par polyaddition.....121
Caractéristiques des polyimides par polyadd..122
Applications.....122
Résines phénoliques.....123
Résines polyesters.....123

Fibres et tissus de renfort.....124
Verre.....124
Aramides.....126
Carbones et graphites.....127
Fibres de bore.....128
Comparaison entre divers types de fibres de renfort....129
Matériaux de centre.....130
Bois de balsa.....130
Mousse thermoplastique.....130
Nid d'abeilles.....131

REGLES DE DESIGN.....132

Formes et standards de moulage.....132
Critères de design.....132
Contrôle de surfaces moulées.....132
Taille + forme de piéces moulées autoc..134
Rayons de raccord et courbures.....134
Découpe des pièces.....134
Inserts et jointages des pièces.....136
Inserts.....136
Inserts mécaniques.....136
Insert collés.....136
Jointage des pièces.....138
Application sandwich.....139
Périmètre des pièces.....139
Formes et rayons de courbure.....139
Applications types.....141
Aéronautique.....141
Pales d'hélicoptère.....141
Ailerons, stabilisateurs et empennage...141
Composante d'avion de chasse.....141
Aérospatiale.....142
Portes cargos des navettes spatiales....142
Transport publique (terrestre).....142
Produits récréatifs.....142

ANALYSE ET SIMULATION DU MOULAGE PAR AUTOCLAVE.....143

Effets de la séquence de laminage.....143
Choix du système matrice/renfort.....143
Séquence de laminage.....144
Pré-compression du laminé.....144
Effets de la polymérisation.....144
Analyse et compréhension des composites.....145

POTENTIEL DU MOULAGE PAR AUTOCLAVE.....146

Compréhension phénomène d'écoulement résine..147
Habilité à maitriser l'analise de composites.147
Caractérisation des matériaux.....147
Nouveaux matériaux.....147
Potentiels pour des matériaux "économiques".....148

LES THERMOPLASTIQUES ARMES DE FIBRES LONGUES (TPFL)....150

Nomenclature des thermoplastiques fibres longues..151
Distinction des types de TPFL.....153
Thermoplastiques renforcés estampables.....153
Tissus thermoplastiques thermoformables.....153
Aspect physique des TPFL avant moulage.....154
Imprégnation matrice/renfort.....154
Tissage hybride fils th.plast/renfort.....154
Déposition de poudre th.plast sur le renfort.154

DETAIL DES SYSTEMES DE THERMOPLASTIQUES FIBRES LONGUES.155

AZDEL.....157

Matériel.....157
Type.....157
Caractéristiques.....157
Principales variantes.....158
Azmet.....158
Azloy.....158
Ryton.....158
Iso-Gmt-Pet.....158
Iso-Gmt-Pa.....158
"HDPE lofted type".....158
Moulage.....159
Opération.....159
Préparation de la charge.....159
Chauffage du matériel.....160
Compression de la charge.....160
Refroidissement et démoulage.....160
Equipements de moulage.....162
Presses.....162
Four a chauffage.....162
Moules.....162
Applications.....163
Règles de design.....163
Applications types.....164

RYTON.....165

Matériel.....165
Type.....165
Ryton à fibres isotropiques.....165
Ryton à fibres orientées.....165
Caractéristiques.....166
Principales variantes.....166
Moulage.....167
Moulage VS structure crystalline du matériel.167
Propriéte résutant d'une haute cristal..167
Opération de moulage.....168
Moulage par compression (estampage).....168
Moulage par thermoformage.....170
Equipement pour thermoformage.....172
Système de "compaction" du laminé.....172
Four.....172
Presse.....172
Moules.....172
Applications.....173
Moulage par estampage (règles de design).....173
Moulage par thermoformage (régles de design).173
Applications types.....174
Aéronautique.....174
Exploitation pétrolière.....174
Militaire.....174
Automobile.....174
Industriel.....174

APC-2.....175

Matériel.....175
Type.....175
Caractéristiques.....175
Variantes des APC-2.....176
Cobinaison matrice/renfort.....176
Mode d'imprégnation matrice/renfort.....177
Imprégnation de la masse.....177
Sandwich film th.plast renfort.....177
Co-tissage.....177
Imprégnation poudre.....177
Moulage.....178
Détail de l'opération de moulage.....180
Bagging.....180
Chauffage.....180
Stabilisation.....180
Refroidissement.....181

Equipement de moulage.....181
Presse-clave.....181
Equipement de bagging.....181
Moules.....182
Plaque de compression (caule plate).....182
Design.....183
Règles de design.....183
Domaines d'application.....183

ANALYSE ET SIMULATION DU MOULAGE DES TPFL.....184

Paramètre communs aux trois systèmes.....184
Morphologie du polymère.....184
Phénomènes reliés au chauffage du polymère...185
Paramètres spécifiques aux moulages par estampage.186
Ecoulement de la matière.....186
Forme des pièces.....186
Paramètre de moulage.....186
Paramètres spécifiques au thermoformage.....187
Paramètres spécifiques au presse-clave.....187

POTENTIEL DES THERMOPLASTIQUES A FIBRES LONGUES.....188

INDEX.....189

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Discuter des procédés de moulage par compression et par autoclave, c'est aborder un très vaste champ du secteur des matériaux polymères.

Alors que la compression est apparue dès la commercialisation des plastiques, le moulage par autoclave touche à des domaines aussi "évolués" que l'aéronautique et l'aérospatiale.

Malgré cet écart apparent, ces techniques ont en commun le fait d'être à base de matériaux composites dont les matrices et les renforts sont souvent du même type.

Le moulage par compression et par autoclave furent longtemps limités aux seuls thermodurcissables. Bien que ces polymères soient toujours largement employés, la récente mise au point de thermoplastiques à fibres longues élargit les horizons de ces procédés.

Ce livre traite du moulage par compression et par autoclave, en couvrant les thermodurcissables et les thermoplastiques à fibres longues.

Face à l'étendu des domaines touchés par ces procédés, l'objectif se limite a en dresser un bilan technique qui permette de mieux les saisir.

Sans être un manuel technique approfondi, ce travail analyse chaque procédé individuellement tout en s'efforçant de les situer les uns par rapport aux autres.

Ce regard "par la tranche", vise a faciliter la comparaison entre les divers systèmes, sans négliger la mise en lumière de leur spécificité technique.

En écrivant ce livre, je souhaite apporter mon humble contribution à l'industrie canadienne des plastiques, en présentant des procédés de moulage qui occupent une place importante de ce secteur industriel.

Pierre Larivière, T.Sc.A.

MOULAGE COMPRESSION

DESCRIPTION GENERALE DU PROCEDE DE MOULAGE PAR COMPRESSION

HISTORIQUE

Le moulage par compression est une technique adaptée au moulage des résines thermodurcissables. En général, les matériaux pour la compression se présentent sous formes de mélanges à mouler (compounds) auxquels sont ajoutés des charges et des renforts, qui en améliorent les performances.

C'est vers 1910, avec la mise au point des résines de Phénol-Aldhéhyde, que fut introduit le moulage par compression. Plus tard, le développement des résines d'urée-formaldhéhyde, (1926) et de la mélamine (1935), élargit l'utilisation de ce procédé.

Au cours des ans, l'arrivée de thermoplastiques, plus diversifiés et performants, a progressivement réduit le domaine d'application de la compression. Ce n'est qu'au milieu des années 60, avec la mise au point des pré-imprégnés polyester (SMC), que la compression a connu un nouvel essor.

Le SMC origine de la maîtrise du phénomène d'épaississement de la résine en présence de composés de types MgO.Le développement de ce compound fut par la suite accéléré par l'introduction des formulations à bas retrait de type "low profile".

Le SMC et ses dérivés sont devenus les matériaux majeurs de la technique de moulage par compression. Les performances structurales possibles avec les nouvelles formulations laissent beaucoup de potentiel pour les SMC.

En ce qui a trait aux autres compounds, il faut noter un intérêt pour la mise au point des SMC à base de résine phénolique. Ces formulations étant particulièrement prometteuses pour rencontrer les normes de feu/fumée/toxicité en vigueur dans les secteurs du transport et de l'aéronautique.

MODE D'OPERATION

Le moulage par compression est une méthode relativement simple, dont la séquence suit les étapes suivantes:

1) Une quantité déterminée de matière est pesée ou mesurée, en fonction de la charge à mouler.

2) Cette matière première, généralement sous forme de poudre, de granules ou de compound est placée au creux d'un moule à sections mâle/femelle. Dans certains cas, la charge est d'abord chauffée pour en accélérer la polymérisation.

3) Le moule qui dans la majorité des cas est chauffé, est monté sur une presse. Lorsque le moule est fermé, l'effet combiné de la température et de la pression, force le mélange à base de résine thermodurcissable à se répandre dans toute la cavité, où il est chauffé et fortement compressé.

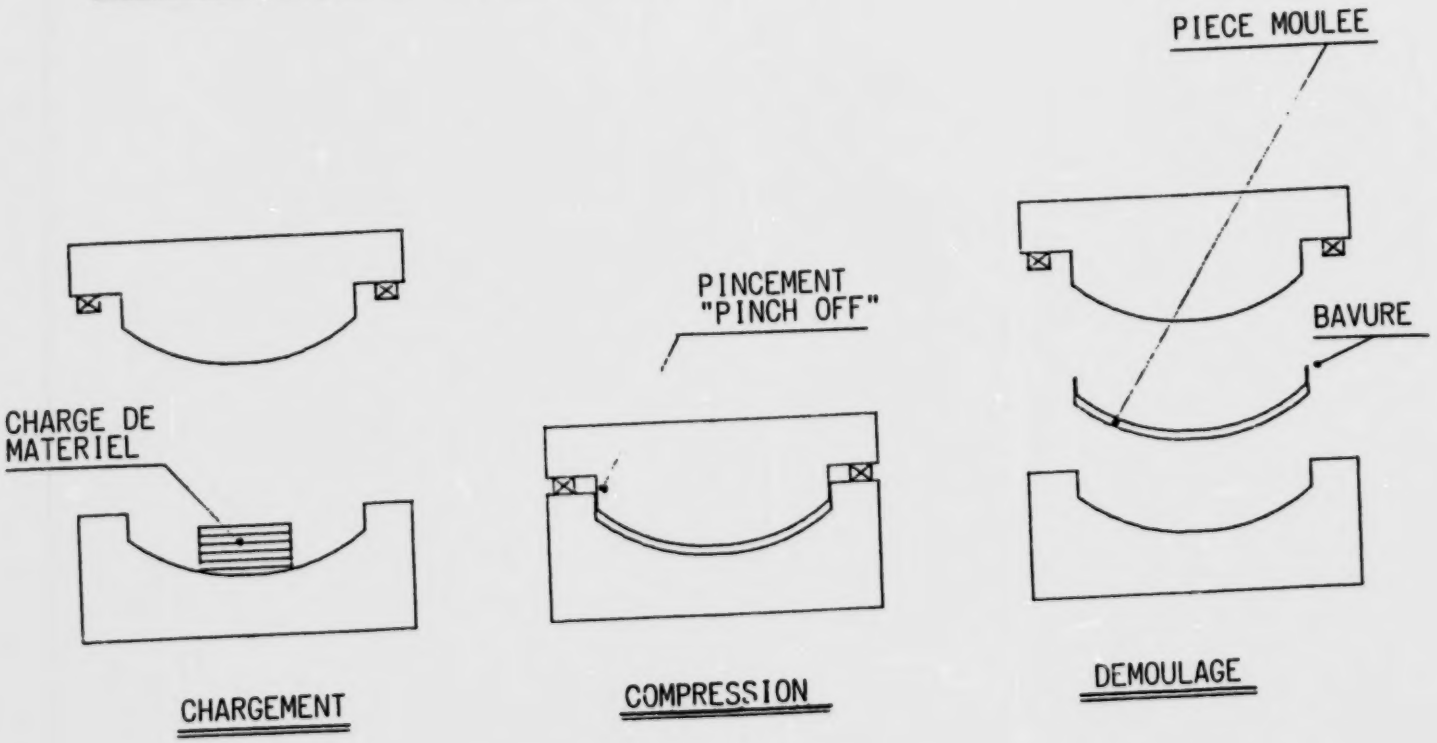
4) La chaleur du moule et dans certains cas des systèmes de catalyseurs, permettent la polymérisation rapide du mélange compressé, qui se fige alors en un solide réticulé.

5) Après un temps de cure, variant de quelques secondes à quelques minutes, le moule est ouvert et la pièce en est éjectée.

6) Pour la plupart des pièces, viennent ensuite les opérations d'ébarbage et de finition. Celles-ci consistent à enlever l'excès de matière localisé au plan de joint et à compléter les perçages et le dégagement des ouvertures.

La localisation de la matière dans un moule ouvert, permet d'employer des compounds fortement chargés ou avec des renforts de fibres longues. De plus, le mode de compression permet de bâtir une pression uniforme dans le mélange non polymérisé ce qui amoindrit, dans une certaine mesure, des phénomènes tels que l'orientation ou la séparation laminaire, rencontrés dans d'autres techniques.

SCHEMA DU PROCEDE DE MOULAGE PAR COMPRESSION



POSSIBILITES ET LIMITES DU PROCEDE

De nos jours, une large partie du moulage par compression est faite avec des SMC. Ce progrès est en partie dû aux développements des matériaux et des techniques, permettant entre autre, d'améliorer le fini de surface, tout en maintenant les propriétés structurales du produit. L'introduction de systèmes "in-mould coating" favorisant l'utilisation du SMC dans le secteur automobile.

D'autre part, la résistance mécanique, qui est typique aux SMC, peut atteindre de nouveaux paliers par des formulations lourdement chargées ou à fibre orientée; tel que le permettent les HMC ou les XMC.

D'autres matériaux que le polyester sont aussi mis au point pour la technique du SMC. Les SMC phénoliques, entre autres, présentent un intérêt dans le secteur de l'aéronautique et du transport en commun. Leur bonne tenue vis-à-vis les normes feu/fumée/toxicité étant l'élément les favorisant pour la production de pièces d'habillage.

Des BMC époxy sont aussi dans des phases de développement et ces compounds offrent de bonnes propriétés électriques et mécaniques.

Les poudres à mouler à base de phénolique, de mélamine et d'urée, de même que les BMC polyesters servent toujours à la fourniture d'équipements électriques ou dans la fabrication d'articles ménagers. Malgré la concurrence constante des thermoplastiques, les compounds et les poudres à mouler, demeurent des solutions souvent compétitives pour des applications "sévères". Ceci est d'ailleurs favorisé par l'introduction de nouvelles formulations plus performantes.

Malgré les inconvénients de la relative "lenteur" du moulage par compression, ce procédé demeure intéressant. Ce fait est en partie attribuable aux systèmes SMC, qui sont de plus en plus utilisés, mais aussi à l'introduction de compounds de plus en plus performants.

EQUIPEMENT POUR LE MOULAGE PAR COMPRESSION

PRESSE A MOULAGE

Selon le matériau moulé, les presses hydrauliques utilisées pour la compression, doivent pouvoir appliquer des pressions de l'ordre de 800 à 2000 psi, sur la surface projetée de la pièce à produire.

Il est important que les vitesses de fermeture soient ajustables. Elles sont rapides pour les déplacements à vide et lentes durant les phases de compression et en démoulage.

Les moules ont une section d'encastrement formé d'un pincement serré au niveau du plan de joint (pinch off), cette configuration implique une grande précision et une bonne rigidité de la presse, afin d'éviter d'abimer les moules.

Enfin, les presses doivent être munies de contrôle du temps de cycle, régissant les diverses étapes de la séquence de moulage.

En général, les presses opèrent en mode semi-automatique ou automatique. Dans les presses semi-automatiques, toutes les fonctions de vitesse, température, pression et temps sont régies en automatique, alors que le chargement et le déchargement du moule sont manuels, contrairement aux presses automatique où même ces deux fonctions sont automatisées.

EQUIPEMENTS PERIPHERIQUES

Au minimum, les équipements périphériques sont constitués des systèmes assurant le chauffage du moule et des balances pour le dosage des charges, ainsi que des équipements d'ébarbage et de découpe.

Pour les presses opérant en automatique, il faut ajouter les équipements pour la manutention des charges et des pièces. Enfin, certains mouleurs possèdent leur propre équipement de mélange et de formulation des compounds.

MOULES POUR LE MOULAGE PAR COMPRESSION

CONFIGURATION GENERALE

Deux des facteurs régissant la conception des moules sont les hautes températures de moulage et les fortes pressions d'opération. Pour ces raisons, les moules sont presque toujours usinés dans des blocs d'acier.

PINCEMENT

La forte réduction de volume, entre la matière brute chargée dans le moule et la pièce moulée, impose une configuration particulière afin d'éviter que le compound ne chasse lors de la fermeture du moule.

Cette configuration est un pincement (pinch off) au périmètre de la cavité. Elle permet d'emprisonner la matière dans le moule, avant le début de la compression.

CHAUFFAGE

Les moules peuvent être chauffés par des crayons électriques ou des fluides tels que l'huile ou la vapeur d'eau sous pression.

La contrainte étant de maintenir une bonne uniformité de température entre les différentes parties du moule.

EJECTION DES PIECES

Les moules sont souvent munis de systèmes éjecteurs, qui peuvent être commandés par le mouvement des plateaux de la presse ou par un système autonome.

CONTROLE

Les principaux éléments de contrôle du procédé de compression des thermodurcissables sont:

- PRESSION
- VITESSE
- TEMPS
- TEMPERATURE

Selon la matière moulée, s'ajoutent à cette liste des facteurs tels que: le dosage, la localisation de la charge, la préparation des matériaux et la configuration du moule.

PRESSION

La pression dans le moule peut varier de quelques 800 à plus de 3000 psi.; la configuration du moule et le type de compound étant les éléments régissant les paliers de pression.

VITESSE

Bien que les vitesses puissent être rapides pour l'approche ou le dégagement des sections du moule, ellesdoivent être ralenties à un niveau précis lorsque la matière est mise sous pression.

La charge doit se répandre dans le moule, assez rapidement pour ne pas polymériser avant le remplissage mais assez lentement pour éviter de chasser ou de créer des lignes de fluage.

TEMPS

Il s'agit essentiellement du temps de polymérisation, qui est fonction des températures, du type de résine et des épaisseurs à mouler.

TEMPERATURE

Comme il s'agit de thermodurcissable, dans la grande majorité des cas, la polymérisation se fera à haute température, dans une moule chaud. Ces températures sont généralement entre 250 et 350 F.

MATERIAUX POUR LA COMPRESSION

Cette section présente brièvement les pricipaux matériaux thermodurcissables rencontrés dans la technique du moulage par compression.

ALLYL

Le diallyl phtalate, principale résine de cette famille, donne des compounds produisant des pièces à bonne résistance diélectrique, ayant une bonne tenue chimique et une résistance mécanique élevée.

Le matériau, assez coûteux, est surtout employé dans des applications électriques à hautes performances.

AMINOPLASTES

Les deux principaux compounds de cette catégorie sont l'urée formaldhéhyde et la mélamine. Comme les phénoplastes, celles-çi peuvent contenir divers types de charges pour en modifier les propriétés.

Les aminoplastes sont faciles à pigmenter et elles produisent des pièces très dures et résistantes à l'abrasion. Elles ont toutefois une certaine sensibilité à l'eau bouillante et de plus un retrait important.

EPOXY

Il s'agit de matériaux à haute résistance mécanique et présentant un retrait très faible. On les retrouve sous forme de pâte à mouler, généralement chargée de fibre de verre.

PHENOPLASTES

Ces matériaux se présentent sous formes de compounds à mouler, qui peuvent être chargés de fibre de verre, d'amiante, de mica ou de farine de bois.

Ces résines ont une bonne tenue en température et un très faible taux de fluage. Cependant elles ont une faible résistance à l'arc et le choix de couleur est très limité.

POLYESTERS

Ces résines occupent la majeure partie du marché de la compression. On les retrouve souvent sous forme de préimprégné polyester (SMC) ou de compound (BMC).

Les mélanges à base de polyester insaturé sont souvent chargés de fibre de verre. Ces matériaux ont une bonne tenue mécanique et ils peuvent être formulés pour rencontrer un large éventail de spécification.

SILICONES

Quelques grades de silicones, adaptés au moulage par compression, permettent d'obtenir des pièces résistantes à la chaleur et ayant une bonne tenue diélectrique.

POLYIMIDES THERMODURCISSABLES

Ce sont des résines ayant une très bonne résistance à la chaleur et au froid. Très coûteuses, elles servent surtout dans les applications aérospatiales.

REGLES DE DESIGN

Le déplacement de la matière lors de la fermeture du moule et son fort taux de charges et de fibres de renfort, sont des facteurs influençant le design du produit moulé par compression.

Les quelques règles de design énoncées ici, seront reprises et détaillées plus loin dans ce dossier.

ANGLE DE DEMOULAGE

Toutes les sections intérieures et extérieures des pièces doivent avoir un angle de démoulage d'au moins 1 degré (soit 0.5 degré par face).

RAYONS DE RACCORD

Les rayons minimums doivent être de 1/16". Cependant, dans tous les cas où la chose est possible, il est préférable d'augmenter les rayons à leur maximum.

EPAISSEURS DES MURS

Avec le SMC et le BMC, il est recommandé que les épaisseurs des murs soient entre 0.080" et 0.0300".

RENFORTS ET MEMBRURES INTEGRES

Il est possible d'intégrer des nervures au dos de la pièce, celles-ci permettent d'accroitre la rigidité sans pour autant sacrifier sur le poids.

INSERTS

Les ancrages et les inserts peuvent dans certains cas être intégrés au moulage, mais le plus souvent ils seront ajoutés en opérations secondaires, dans des niches spécialement prévues pour les recevoir.

CHAMPS D'APPLICATION

Les compounds thermodurcissables sont reconnus pour leur résistance thermique, leur possibilité de rencontrer des normes de feu, leur propriété diélectrique et surtout leur bonne tenue structurale, obtenue grâce à l'incorporation de fibres de renfort.

Les principaux domaines pouvant prendre avantage de ces caractéristiques sont les suivants:

- COMPOSANTES ELECTRIQUES
- SECTEUR AUTOMOBILE
- APPAREILS INDUSTRIELS ET DOMESTIQUES

COMPOSANTES ELECTRIQUES

Il s'agit des contacteurs et modules isolants, de toutes tailles, ainsi que des boitiers électriques. Ces équipements sont surtout moulés en compounds thermodurcissables ou en BMC.

SECTEUR AUTOMOBILE

Les SMC, faits de fibres longues et pouvant être moulés en grandes pièces, répondent bien aux contraintes du secteur automobile. De plus, la mise au point des formules "low profile", offrant un bon fini de surface, ouvre les SMC aux applications à la fois structurales et esthétiques, telles les pièces de carrosseries.

Il faut aussi inclure la fabrication de composantes des voitures de transport en commun, qui prennent avantage de la bonne tenue au feu pouvant être atteinte avec les SMC.

APPAREILS INDUSTRIELS ET DOMESTIQUES

Les compounds thermodurcissables se retrouvent enfin dans une foule de produits d'usage général, tels que des coquilles de sièges, des boîtiers d'appareils ménager des coques d'éviers et même des fonds de douche. Toutes ces pièces mettent à profit les propriétés physiques et mécaniques des thermodurcissables.

VARIANTES DU PROCEDE DE MOULAGE PAR COMPRESSION

COMPRESSION A BASSE PRESSION AVEC RESINE LIQUIDE

Ce procédé de moulage, aussi appelé "cold press" est fait dans des moules en matériaux composites ou en aluminium. Les pressions de moulage sont inférieures à 100 psi et les moules peuvent ne pas être chauffés.

Les résines utilisées sont surtout des polyesters insaturés, réagissant à température ambiante avec des systèmes de catalyseurs de type peroxyde. Les résines peuvent être chargées de carbonate de calcium et elles contiennent des pigments et des agents démoulants. Les renforts sont des fibres de verre, en tissu mat, en préforme ou en tissus croisés.

Le renfort de verre est posé à sec dans le moule et le mélange résine catalyseur y est versé. Le moule en se fermant, force la résine à imbiber le tissu et à occuper tout l'espace de la cavité.

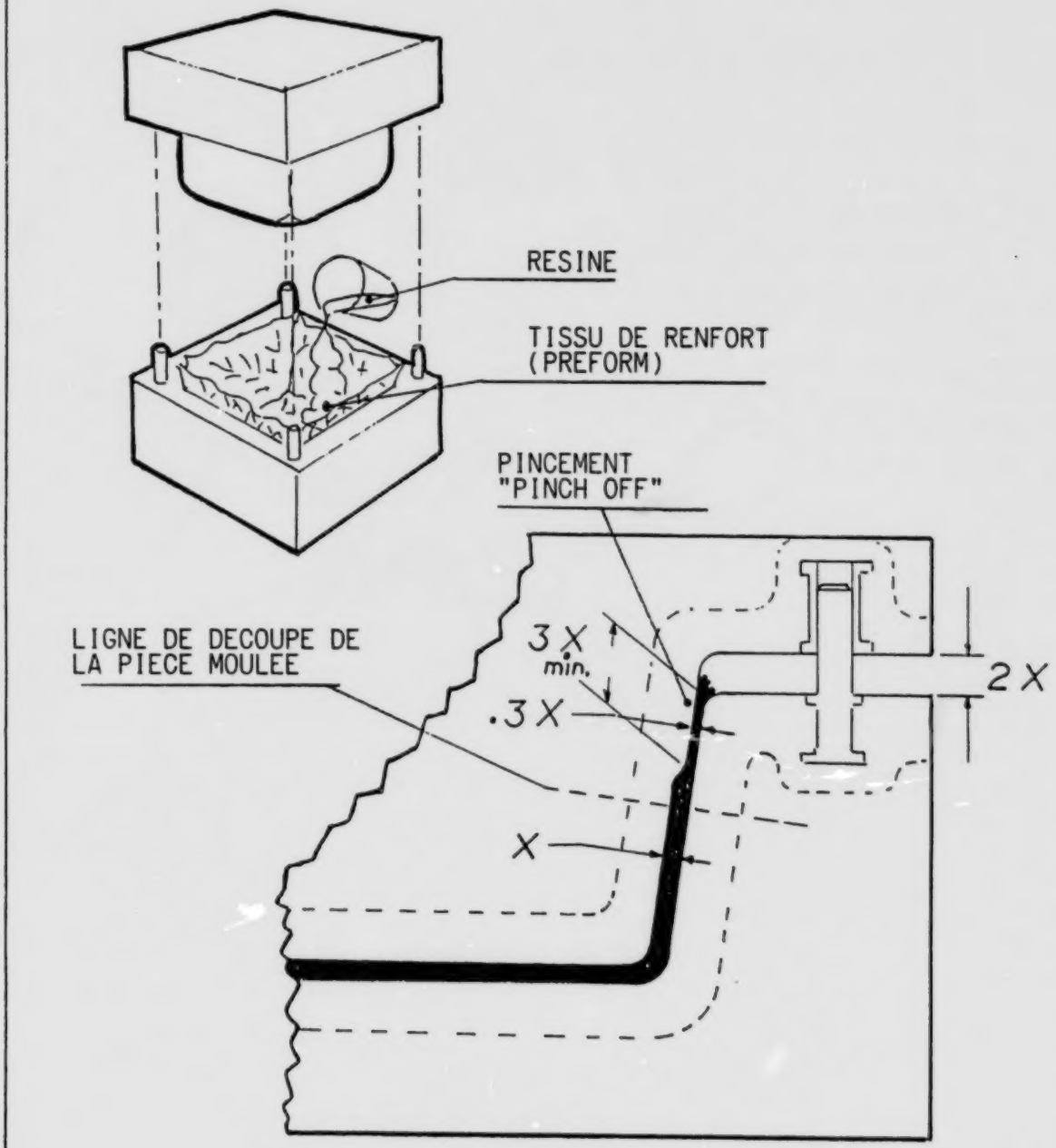
L'excédent de matériel s'échappe par la zone de pincement (pinch off), située tout autour du moule. Pour être efficace, l'épaisseur du pincement doit faire de 1/4 à 1/3 de l'épaisseur de la pièce.

Après un temps de polymérisation de quelques 2 à 5 minutes, le moule est ouvert et la pièce en est retirée. Celle-ci doit alors être découpée pour enlever l'excès de matière au pincement.

Ce procédé est relativement lent et exige beaucoup d'opérations secondaires. Ses possibilités de design, telles que les variations d'épaisseur et de la pose d'insert sont assez limitées. Enfin, les surfaces moulées présentent un taux assez élevé de porosité.

Par contre cette technique ne requiert que peu d'outillage et elle est relativement rapide à mettre en production. Ce procédé demeure toutefois un intermédiaire entre la technique du moulage par contact et la compression à haute pression.

MOULAGE PAR COMPRESSION "BASSE PRESSION / RESINE LIQUIDE"



COMPRESSION HAUTE PRESSION AVEC RESINE LIQUIDE

Cette technique aussi appelé "matched die molding" est en quelque sorte "l'ancêtre" du SMC. Elle se fait à haute pression (300 à 800 psi) et dans des moules métalliques chauffés (250 à 350 F).

Les résines polyesters utilisées dans ce procédé, sont fortement chargées de carbonate de calcium et elles contiennent des agents démoulants à base de stéréate et des pigments. La fibre de renfort la plus utilisée est le verre en mat à filaments continus ou en tissus préformés.

Le système catalytique de la résine, à base de peroxyde, est ajusté pour agir à haute température. Ce qui permet de préparer les mélanges à l'avance.

Les moules métalliques sont conçus avec un étroit pincement à leur périmètre (pinch off), dont la tolérance n'est que de quelques millièmes de pouce. Cette configuration, lors de la fermeture du moule, tranche l'excès de fibre de renfort. Ceci limite les opérations secondaires, à un simple ébarbage.

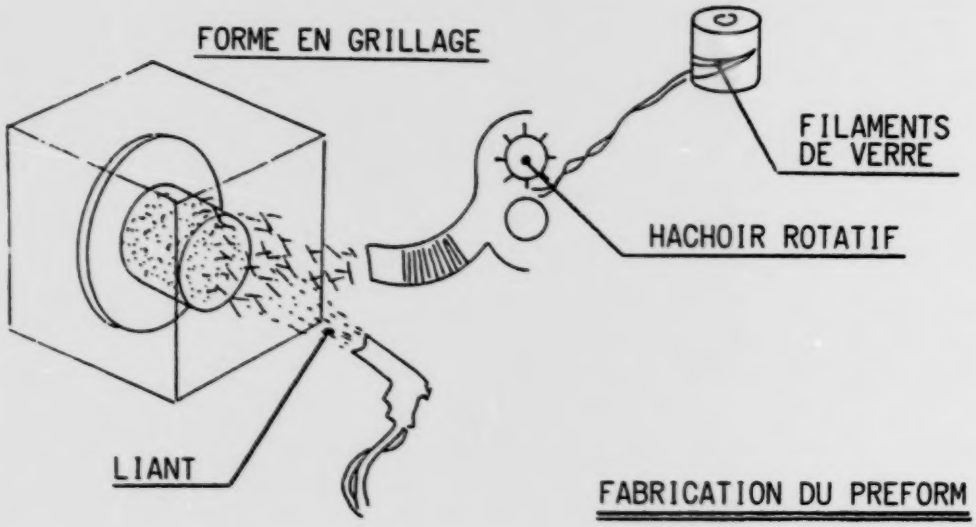
Le "matched die molding" est une technique rapide. Les fortes pressions de moulage et le type de moule utilisé permettent des tolérances serrées.

Il est toutefois relativement difficile d'obtenir des renforts (ribs) ou de contrôler de brusques variations d'épaisseur. Enfin, les tissus de renfort ont avantage à être préformés, ce qui alourdit les opérations et les équipements secondaires.

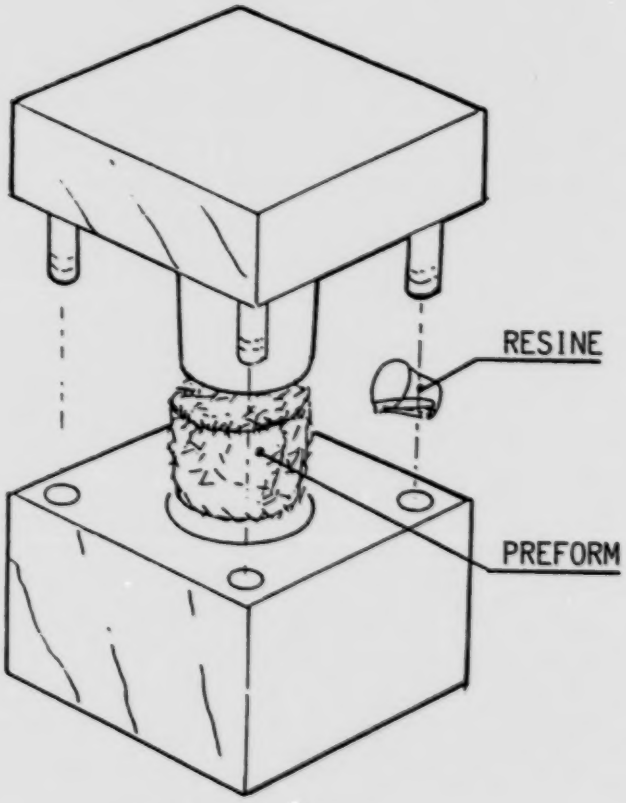
Par contre, ce type de moulage permet une grande flexibilité au niveau des formulations de résines. Celles-ci sont faites sur mesure et peuvent être facilement contrôlées par le mouleur. Enfin, le "matched die molding" peut mouler des sections plus minces que celles possibles avec le SMC, soit environ 0.040" par rapport à quelque 0.080".

Dans l'industrie du moulage, le "matched die molding" est de plus en plus largement remplacé par le SMC. Celui-ci simplifie les opérations de production et assure une qualité plus uniforme.

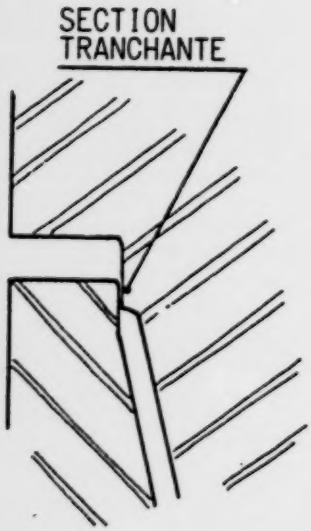
MOULAGE PAR COMPRESSION "HAUTE PRESSION / RESINE LIQUIDE"



FABRICATION DU PREFORM



SCHEMA DE MOULAGE



DETAIL DU MOULE

COMPRESSION TRANSFERT

Ce procédé situé entre la compression et l'injection, consiste à plastifier le compound ou la poudre à mouler dans un pot de transfert pour ensuite le faire passer sous pression à l'intérieur de la cavité du moule.

Les compounds sont en poudre, en granules ou des pâtes à fibrescourtes. La fluidité étant une caractéristique importante du compound, les BMC et DMC à base de polyester se prêtent bien à ce procédé.

Les moules sont à "couteaux" (flash type) sans section télescopique, ce qui en simplifie la conception et élimine les pertes au plan de joint.

Les presses à transfert sont plus complexes que celles pour compression simple, car en plus d'assurer la le mouvement du moule, elles doivent être munies d'un piston tranférant la résine dans la cavité. Les pressions de transfert peuvent être de quatre fois supérieures à celles en compression simple. Ceci doit être considéré dans le choix de la presse, afin d'éviter l'ouverture du moule durant le transfert.

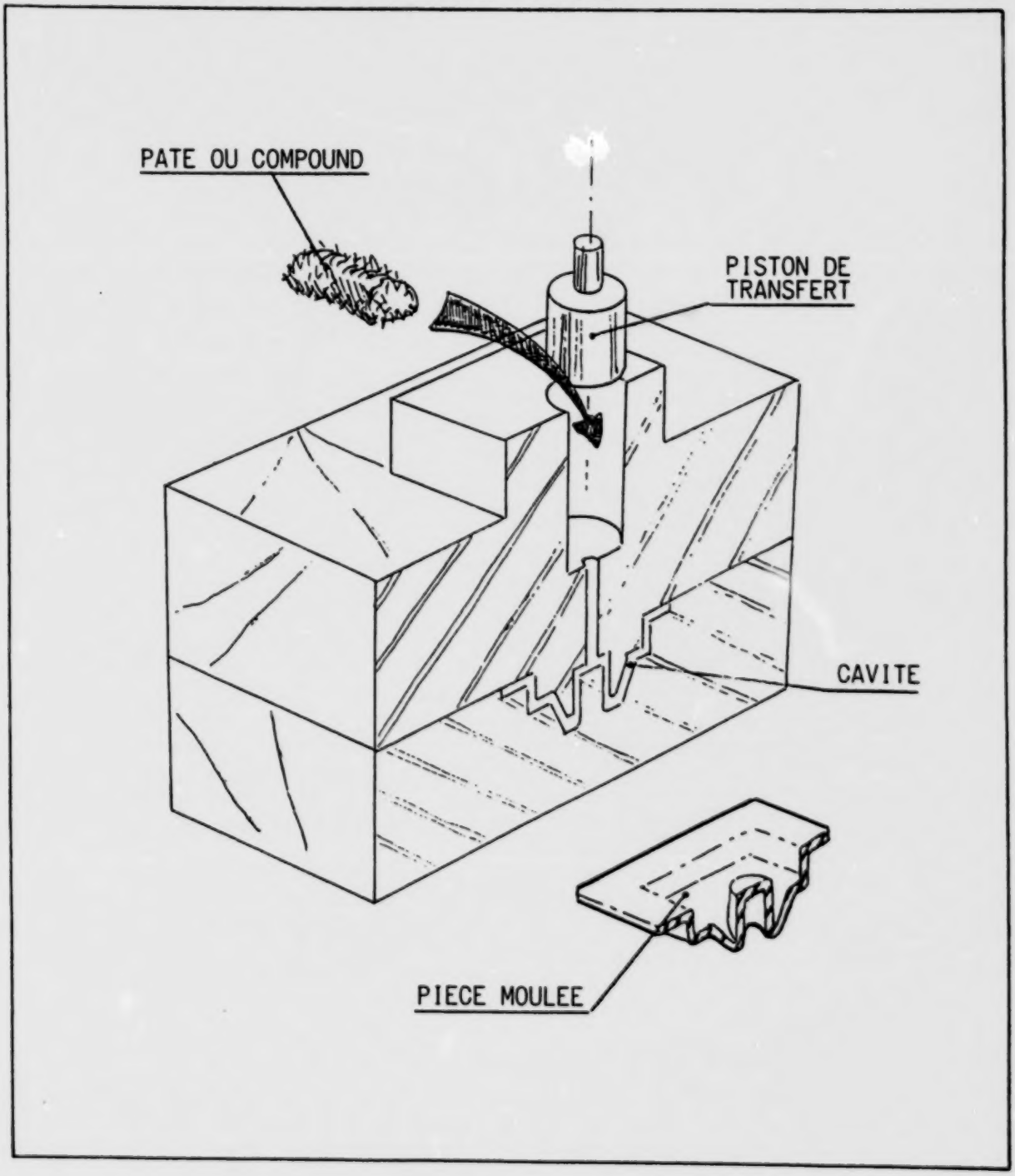
Comme le matériel a un temps de polymérisation très court alors qu'il est en phase de transfert, les cadences de production doivent être élevées.

Le moulage par transfert facilite l'incorporation des inserts. Ceux-ci étant placés avant la fermeture du moule et la matière entrant dans la cavité à basse viscosité, elle entoure facilement les inserts, sans les écraser ou les déplacer. De même, ce mode de moulage s'adapte bien aux formes complexes et au moulage des sections épaisses.

Par contre, le transfert détériore un peu la résine et rend la pièce plus fragile. Aussi, il y a orientation de la matière, pouvant causer des lignes de faiblesse ou des distorsions dues à un retrait non uniforme.

Le moulage par transfert se modifie peu à peu grâce à la nouvelle génération de presses à injection pour thermodurcissables. Ces équipements devenant intéressants, surtout avec la mise au point des ZMC qui sont des compounds polyester conçus pour l'injection.

MOULAGE PAR COMPRESSION/TRANSFERT



EQUIPEMENTS POUR LE MOULAGE PAR COMPRESSION

PRESSES

La spécificité des résines a forcé la mise au point de presses hydrauliques spécifiquement adaptées aux contraintes des matériaux thermodurcissables. Aujourd'hui il existe une large gamme de presses de divers tonnages et conceptions et qui sont standardisées pour ces matériaux.

Les principaux éléments caractérisant les équipements sont:

- CAPACITE ET PRESSION
- STRUCTURE ET CONCEPTION DU CHASSIS
- MODE DE MOUVEMENT DES PLATEAUX
- PRECISION DES MOUVEMENTS DU PLATEAU
- CONTROLES ET ASSERVISSEMENT DES SEQUENCES

CAPACITE ET PRESSION

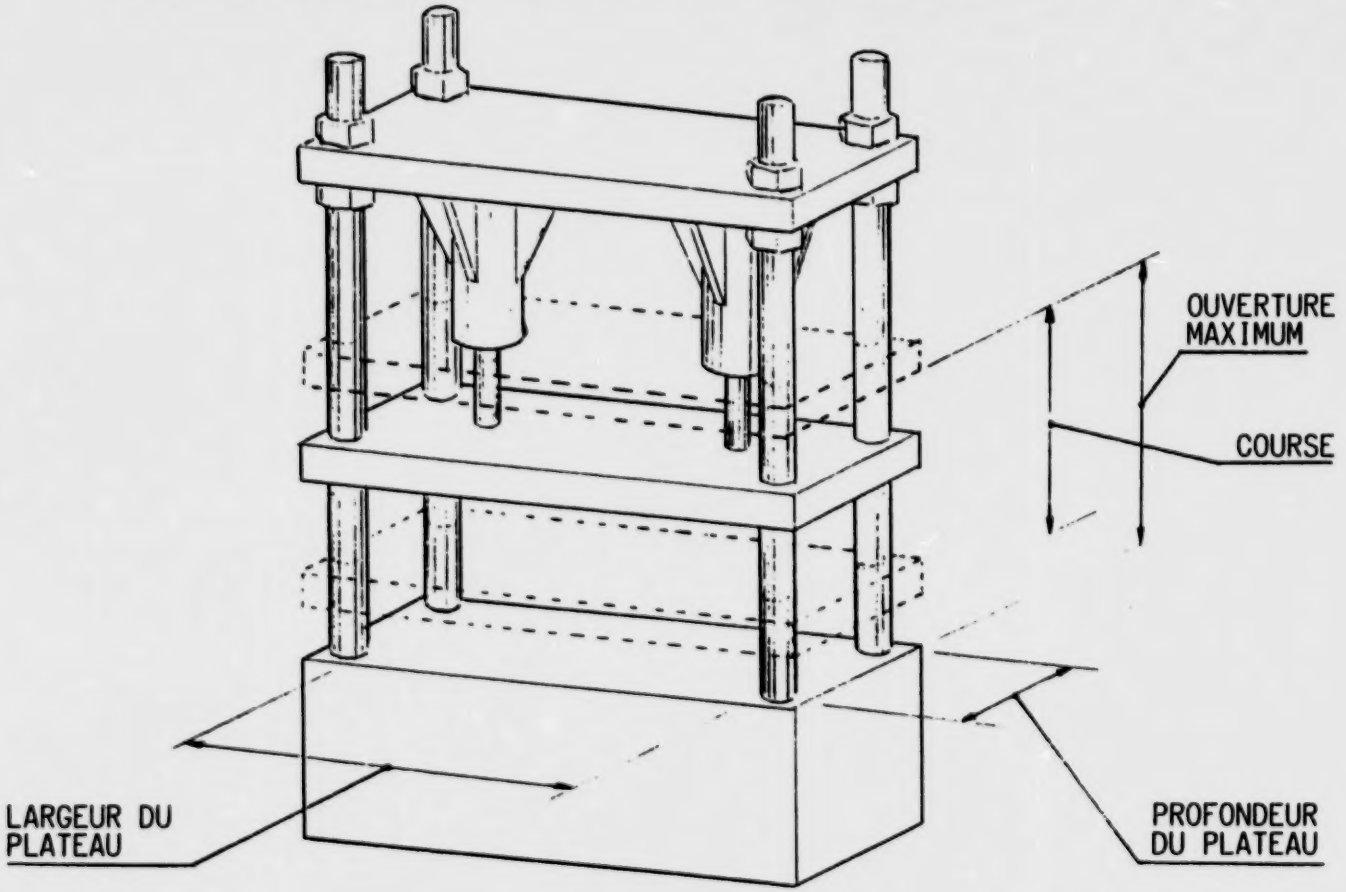
Les premiers facteurs régissant la sélection d'une presse, sont sa puissance et la taille du moule qu'elle peut opérer; ces deux éléments étant bien entendu intimement reliés.

Pour le moulage du SMC, les pressions exercées sur la pièce sont en général entre 800 et 1500 psi. La capacité de la presse sera donc choisie de manière à pouvoir accommoder cette contrainte.

En ce qui a trait à la grandeur des plateaux, il y a trois caractéristiques, soit la largeur, la profondeur et la hauteur libre; ce dernier point devant tenir compte de la taille du moule, mais aussi de l'espace nécessaire au démoulage.

Enfin, la grandeur du déplacement du plateau doit être spécifiée en fonction de la grosseur du moule et de l'espace nécessaire au démoulage.

SCHEMA D'UNE PRESSE A COMPRESSION DE TYPE "DESCENDANTE"



STRUCTURE ET CONCEPTION DU CHASSIS

Il existe deux grandes catégories de presses, celles à colonne et celles à cadre rigide.

PRESSES A COLONNES

Les presses à colonnes sont constituées de plateaux coulissant sur quatre colonnes de guidage. Ces presses, plus standard sont largement répandues.

Parmi les avantages de ce type de presse, il y a un bon accès au moule, sur quatre faces et leur coût généralement plus bas. Par contre, ces équipements sont souvent moins rigides et leur précision moins bonne. Ce qui peut être une limitation importante pour certaines applications.

PRESSE A CADRE

Elles sont faites de lourdes structures mécanosoudées, qui guident les plateaux avec précision et assurent une grande rigidité. Leur complexité de fabrication en augmente les coûts. Par contre elles maintiennent un parallélisme des plateaux, plus serré.

Généralement, les cadres sont munis de glissières à 45 degrés qui permettent de maintenir un bon ajustement des plateaux et de compenser en partie les mouvement d'expansion et de contraction.

Ce type de presse est de plus en plus favorisé, surtout pour les moulages des grandes pièces minces ou pour les techniques de "In mould coating".

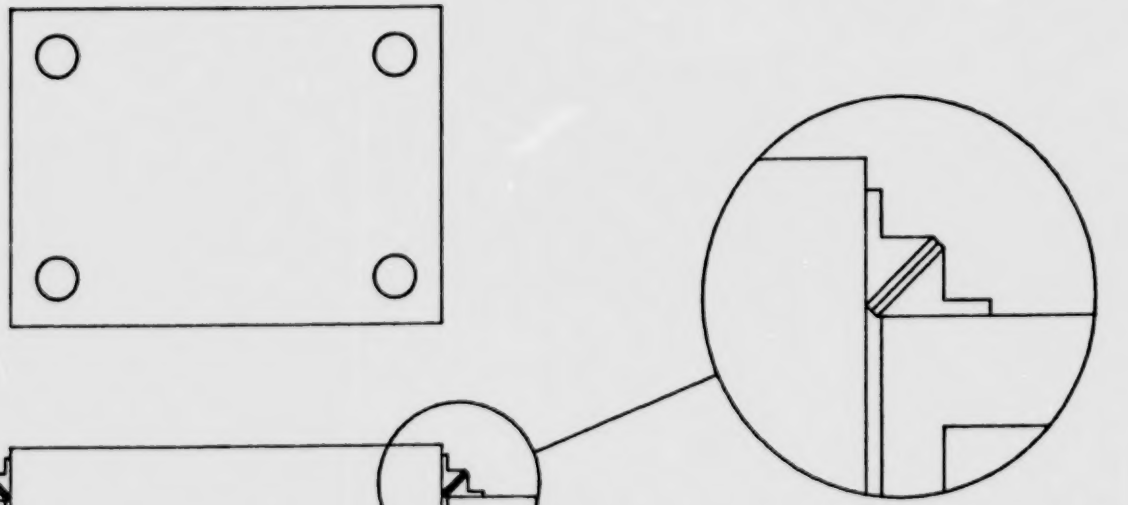
MODE DE MOUVEMENT DES PLATEAUX

Le plateau mobile peut être "montant" ou "descendant". Dans le premier cas il n'est pas nécessaire de prévoir un mécanisme de sécurité pour garder le plateau en haut lorsque l'opérateur travaille sur le moule.

Les systèmes à plateau descendant sont toutefois plus populaires, malgré leur coût légèrement plus élevé. La raison vient du meilleur accès au moule, en tout temps du cycle.

DETAIL DES SYSTEMES DE GUIDAGE DES PLATEAUX MOBILES

PRESSE A COLONNES



DETAIL D'UNE GLISSIERE

PRESSE A CADRES

PRECISION DES MOUVEMENTS DU PLATEAU

Le maintien du parallélisme est un critère essentiel pour un moulage de qualité. Mais en plus de la configuration du cadre, ce critère est influencé par les mécanismes assurant la puissance et le contrôle des mouvements du plateau.

Les systèmes les plus élémentaires mais les moins précis ne font appel qu'à une répartition uniforme du débit d'huile vers chaque vérin, alors que les mécanismes les plus évolués font appel à des systèmes asservis qui contrôlent en tout instant la position et le parallélisme des plateaux.

Ces derniers systèmes, bien que plus coûteux sont recommandés pour le moulage avec les systèmes "In-mould coating".

CONTROLES ET ASSERVISSEMENT DES SEQUENCES

En plus des règles régissant la rigidité du cadre et le parallélisme des plateaux, il y a dans le moulage par compression, plusieurs autres fonctions reliées aux équipements et qui influencent la qualité du produit moulé.

Tous ces contrôles peuvent être faits manuellement, mais la qualité du produit favorise l'utilisation de systèmes automatisés.

Les éléments devant être ajustés et contrôlés sont les suivants:

- PRESSION DE MOULAGE
- VITESSE DE FERMETURE ET D'OUVERTURE
- TEMPS DES SEQUENCES DU CYCLE
- TEMPERATURE DES MOULES

PRESSION

Les pressions doivent être lisibles et ajustables en fonction des spécifications de la matière.

Le tableau suivant donne un aperçu des pressions en fonction du matériel:

- UP SMC, BMC	800 à 1500 psi
- UP en granule et PF "soft flow"	2000 à 4000 psi
- Mélamine, UF et PF "stiff flow"	4000 à 6000 psi
- Stiff-flow compounds	6000 à 8000 psi

En plus de la pression de fermeture, il faut aussi régler la pression d'ouverture au démoulage. Dans le cas des SMC, elle est généralement de 20% à 25% de la force de fermeture.

Dans le cas de certains compounds réagissant par polycondensation, tels que les phénoliques, la mise en pression doit être suivie d'une brève ouverture du moule, afin d'évacuer les gaz formés durant la polymérisation.

VITESSE

Les déplacement des plateaux à vide, soit avant la pressurisation du matériel et après l'ouverture du moule, doivent être le plus rapides possible afin de réduire les temps morts dans le cycle de moulage. Ces vitesses en avance rapide peuvent être de 500 po/min.

Une vitesse intermédiaire, qui agit lorsque le moule fait contact avec la matière et est ajustable entre 30 et 100 po/min.

En fin de course, pour assurer une bonne répartition de la matière dans la cavité, une vitesse lente qui est de moins de 15 po/min. Le temps d'application de la vitesse lente ne devrait pas dépasser 4 secondes.

De même à l'ouverture du moule, la vitesse doit d'abord être lente pour le décollage de la pièce et l'opération des éjecteurs, puis rapide pour le dégagement du moule.

TEMPS DES SEQUENCES DU CYCLE

Le temps de polymérisation est le facteur clef régissant tout le cycle de moulage. Celui-ci est relié à l'épaisseur du matériel. Règle générale, il faut environ 1 minute par 0.100" d'épaisseur de la paroi de la pièce à mouler.

TEMPERATURE DU MOULE

Pour que la polymérisation se fasse rapidement et complètement et pour que le remplissage du moule soit bien fait, il importe de respecter les température de moulage.

Pour du SMC, elles se situent entre 280 et 320 F. Les températures doivent être uniformes sur toute la surface du moule, bien qu'un écart de 10 F soit maintenu entre la femelle et le mâle. Cette norme qui consiste à garder la femelle plus chaude que le mâle sert à protéger du soudage les régions du pincement, dont les tolérances sont serrées.

EQUIPEMENTS AUXILIAIRES

COMPOUNDEUSE A BMC ET MACHINE A SMC

Du point de vue de la formulation, les SMC et les BMC sont produits selon des techniques qui en certains points sont semblables.

Les deux techniques comprennent chacune une phase de mélange des résines suivie d'une phase d'incorporation de la fibre de verre.

La phase de mélange des résines, qui est la même pour les deux procédés peut être faite en lots ou en continu. Il s'agit de systèmes mécaniques, dans lesquels sont mélangées les résines, les charges et les additifs.

Dans le cas du BMC, la pâte est transférée dans un mélangeur horizontal, à double bras, dans lequel le verre est ajouté. Cette opération est généralement suivie de l'extrusion du compound en boudins, de manière à mettre le compound sous une forme facile à utiliser.

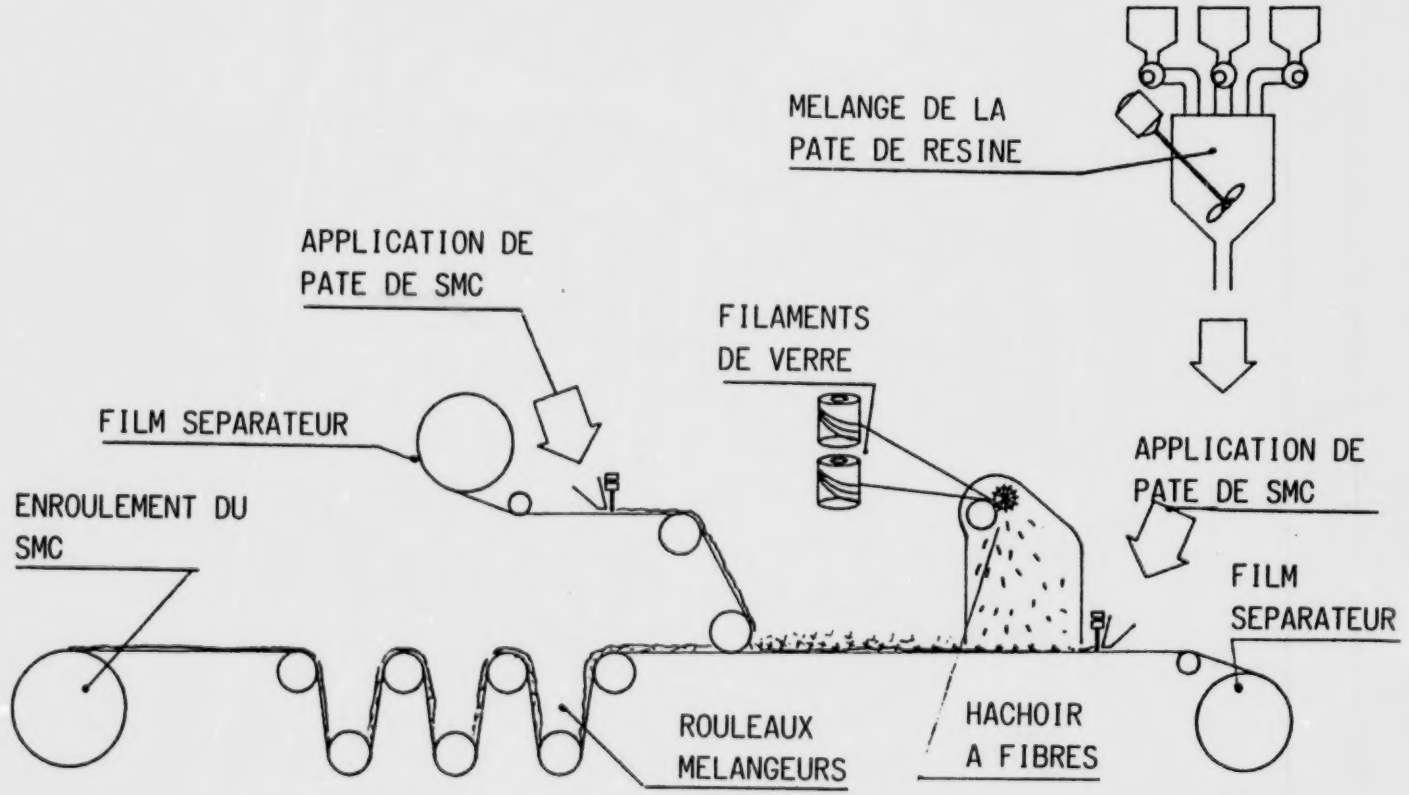
Pour ce qui est du SMC, la pâte est amenée à une calandre et appliquée sur un film plastique entraîné par un tapis roulant. Celui-ci passe sous une pluie de fibres de verre coupées qui distribue le renfort sur toute la surface du film.

Le mélange verre/résine est fait lorsque le film portant ces deux matériaux passe au travers un réseau de rouleaux compresseurs, qui malaxent et uniformisent le mélange.

A la fin de l'opération, le mélange est mis en rouleaux qui sont conduits dans une chambre de maturation, où les agents épaississants auront le temps d'agir et d'augmenter la viscosité du SMC.

La fabrication des SMC est une opération complexe et qui requiert une installation coûteuse et une bonne maîtrise des formulations de matière. Il faut donc une forte consommation de SMC pour qu'un mouleur puisse justifier la capitalisation et l'opération d'un tel équipement.

SCHEMA D'UNE MACHINE A PRODUIRE LE "SMC"



PASTILLEUSE

Plusieurs des compounds en poudre ou en granules ont avantage à être pré-compressés avant d'être moulés. En plus de faciliter le chargement du moule, cette technique permet dans certains cas d'utiliser des moules à couteaux, moins complexes et moins chers que les moules positifs.

Le pastillage consiste à compresser fortement la matière à froid, sans la polymériser. Cette opération faite dans des moules qui ressemblent à des pistons permet de produire des pastilles de densité et de dimension uniformes, qui seront placées telles quelles dans le moule de production.

Les pressions de pastillage peuvent être très importantes et atteindre de 5000 à 25000 psi.

FOUR A PRECHAUFFAGE

Ces appareils sont surtout employés pour les compounds thermodurcissables, autres que les SMC.

Dans la majorité des cas il s'agit de four à haute fréquence (type HR) qui permet de réchauffer uniformément la pâte afin d'en accélérer la polymérisation.

Ces fours sont faits de deux électrodes dont l'espacement est rigoureusement contrôlé. Le compound est placé entre les deux électrodes et agit comme un diélectrique au centre d'un condensateur.

Un fort voltage, pouvant atteindre 6000 V, est appliqué entre les deux électrodes qui changent continuellement de polarité. Les cycles peuvent varier de 50 à 100 Mhz.

Ces oscillations causent une vibration moléculaire dans le compound, qui résulte en un échauffement uniforme et important de la matière.

Il existe d'autres types de fours à préchauffage, tels que ceux à convection ou à infra-rouge, mais ils sont moins utilisés que les fours HR.

EQUIPEMENT DE DECOUPE ET D'EBARBAGE

Dans la plupart des cas, les pièces moulées par compression doivent être ébarbées et parfois des sections doivent être découpées.

Alors que certains ébarbages sont faits manuellement, il est possible d'utiliser des meules automatiques pour nettoyer les pièces.

En ce qui a trait aux découpes, les équipements de pointe utilisent des systèmes à découpe par jet d'eau à haute pression (55,000 psi). Pour être utilisés efficacement, ces appareils ont avantage à être couplés à des bras manipulateurs robotisés.

SYSTEME DE CHARGEMENT ET DE DECHARGEMENT

Les opérations de chargement et déchargement du moule peuvent être automatisées. Soit par utilisation de systèmes de pesée et manutention montés à même la presse, ou comme ce peut être le cas dans le SMC, par des bras manipulateurs.

Pour les SMC, il est aussi possible que les patrons de charge soient découpés en automatique.

SYSTEMES SMC "IN-MOULD COATING"

La progression du SMC dans le marché de l'automobile est liée à la possibilité de la technique de fournir un produit ayant une surface de qualité "Classe A"

Pour y arriver, en plus de l'utilisation de formulation "low profile", l'industrie met au point une série d'enduits applicables sur le moule et qui de ce fait, font partie de la pièce moulée.

Deux techniques de "In-mould coating" sont en phase de mise au point et d'utilisation; les enduits liquides et les enduits en poudre.

ENDUITS LIQUIDES

Les enduits liquides sont généralement appliqués après que la pièce soit moulée. En fin de cycle le moule est entre-ouvert de quelques millièmes de pouce et un enduit réactif, à base de polyester ou d'uréthane y est injecté.

Cette technique s'adapte bien à l'automatisation. Cependant elle implique un contrôle rigoureux du parallélisme de la presse qui ne peut généralement être assuré que par l'utilisation de courts vérins de rattrapage d'assiettes.

Ces vérins, montés aux quatre coins du moule, ont une course très courte et assurent des déplacements très précis de façon à n'ouvrir le moule que de l'épaisseur de la peinture.

Enfin, ces systèmes doivent être reliés à des mélangeurs/injecteurs qui dosent et transferent les enduits dans le moule.

ENDUITS EN POUDRE

Alors que la technique "In-mould coating" liquide est surtout adaptée aux pièces à profil plat, celle à enduit de poudre se prête à toutes les configurations.

Cette méthode consiste à enduire le moule avant le moulage, d'un dépôt de poudre qui durcit en un enduit pigmenté.

L'utilisation de cette technique est plus difficile à automatiser et au mieux, elle peut être faite dans une application par un robot à peinture de type conventionnel, imitant le geste d'un opérateur.

Il semble que les progrès majeurs des prochaines années se fassent dans le domaine des enduits "In-mould coating".

Avec la maîtrise de cette technique, le SMC devrait élargir ses marchés.

ELEMENTS DE CONTROLE DU PROCEDE

FACTEURS RELIES AU CONTROLE DU CYCLE DE MOULAGE

Compte tenu de l'importance du moulage SMC, l'essentiel des éléments de contrôle du procédé présenté dans cette section, couvre cette technique de moulage. Il faut cependant préciser qu'une bonne partie de l'information s'applique aussi aux autres compounds.

PATRON DE CHARGE

La charge à mouler doit être dosée avec précision, de manière à éviter les manques de matériel ou les pertes dues aux bavures.

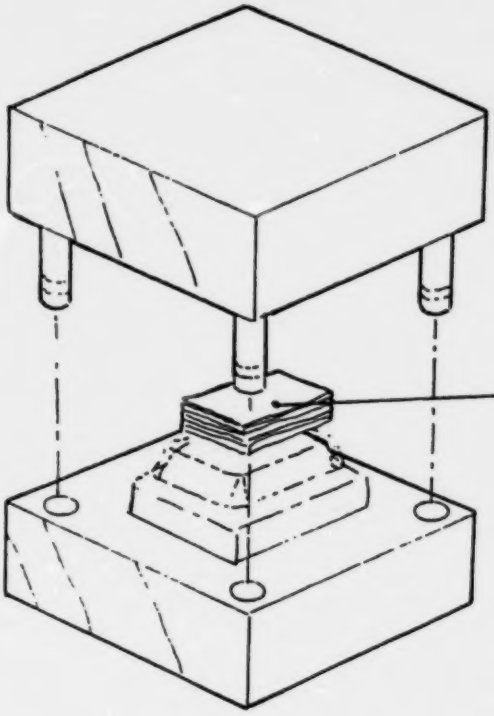
La localisation de la charge influence la qualité de la pièce. Règle générale, la charge ne doit pas représenter plus de 80% de la surface du de la pièce finale.

La configuration de la charge influence des paramètres tels que: la répartition du matériel après moulage, les lignes de soudure des fronts de matières et la qualité du fini de surface.

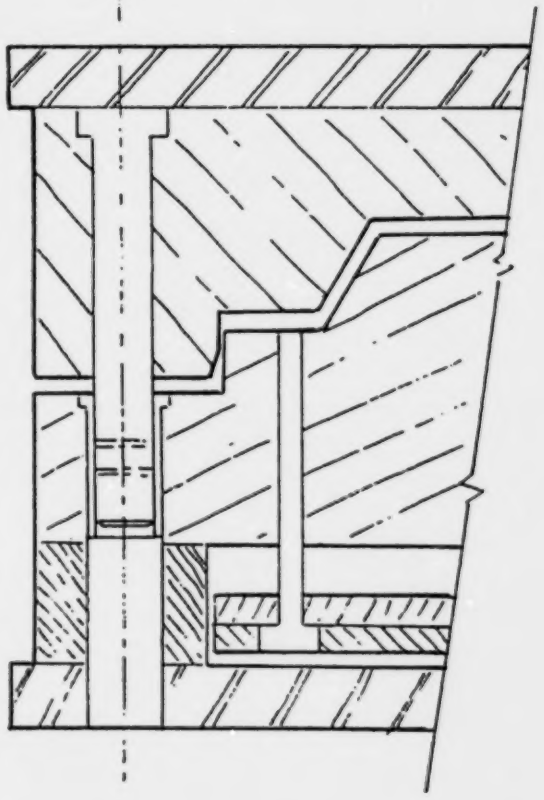
Lors de la fermeture de la presse, le matériel doit "voyager" mais sa viscosité bâtit une contre-pression à l'intérieur de la cavité. Ce facteur agit sur la qualité de surface de la pièce. Par contre, ce mouvement de la matière, cause aussi l'orientation de la fibre ce qui a des effets sur la qualité structurale du produit.

L'empillage des feuilles de SMC selon le patron de charge, doit être fait de manière à éviter les zonesde trappements d'air, qui causeraient des bulles de gaz sur la pièce. Il est, de ce fait, avantageux de charger en pyramide.

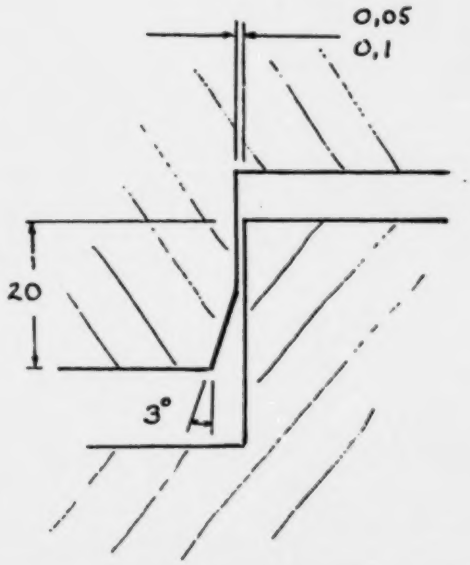
SCHEMA DU MOULAGE PAR COMPRSSION DU "SMC"



SECTION DU MOULE



DETAIL DU PINCEMENT TYPE



TEMPS DE CYCLE

Tel que mentionné au chapitre sur les équipements et les contrôles, la durée du temps de cycle dépend de la température du moule, du type de matériel et de l'épaisseur de la pièce.

Le principal facteur régissant le temps de cure étant toutefois l'épaisseur de la pièce.

Un temps de cure trop court donne des surfaces mates, peut causer des sous-polymérisation et entraîner des gauchissements de la pièce.

TEMPERATURE DE MOULAGE

Des moules trop froid peuvent rendre le démoulage difficile à cause d'une sous-polymérisation, mais surtout causer une perte de lustre sur la pièce. Par contre, une température trop élevée peut causer des bulles de gaz dans la pièce ou des problèmes reliés au pré-gel.

DETERMINATION DE LA VITESSE

Il s'agit surtout des paliers de vitesse de fermeture qui furent définis au chapitre précédent, soit les vitesses d'approche rapides, intermédiaires et lentes pour la compression finale. La vitesse de fermeture agit sur la vitesse de déplacement de la matière dans la cavité. Une vitesse trop lente peut causer un pré-gel du matériel, tandis que le contraire peut entraîner des brûlures sur la pièce.

PRESSION DE MOULAGE

La pression dépend du type de matière, de sa viscosité et de la forme de la pièce. Une pression élevée peut améliorer la qualité du fini de surface et la répartition de la matière.

GUIDE DE CORRECTION DES DEFAUTS SUR LE "SMC":

FACTEURS ▽ / DEFAUTS ▷	BULLES D'AIR	BRULURES	SURFACE MATE	LIGNE D'ECOULEMENT	LIGNE DE JONCTION	POROSITE	SURFACE POUDREUSE	MANQUE DE MATERIEL	
MOUILLAGE DE LA FIBRE	X								
CONTAMINANTS	X								
VISCOSITE	X			X					
REDUIRE TAILLE DE CHARGE	X	X				X	X		
REDUIRE VITESSE FERMETURE		X							
ALLONGER TEMPS DE CURE			X						
AUGMENTER LA PRESSION			X					X	
AUGMENTER TEMPERATURE			X				X		
RELOCALISER LA CHARGE				X	X				
AUGMENTER TAILLE DE CHARGE				X	X				
REDUIRE TEMPERATURE					X			X	
CHARGER EN PYRAMIDE						X			
AUGMENTER POIDS DE CHARGE						X		X	
PLACER RAPIDEMENT LA CHARGE								X	

FACTEURS DE CONTROLE RELIES AU MATERIEL

Dans la majorité des cas, les formulations de SMC sont des recettes standards, déterminées pour rencontrer certains critères spécifiques. Les types d'additifs, le taux de verre et la résine de base étant quelques-unes des variables propres à chaque formulation.

Les deux premiers facteurs que le mouleur doit contrôler sur la matière sont: la viscosité et le vieillissement; les deux étant d'ailleurs reliés.

En effet, les pâtes de SMC ou de BMC sont dans une certaine instabilité qui est due à la présence des additifs épaississeurs de type MgO. Ces éléments augmentent progressivement et continuellement la viscosité du SMC.

Les courbes de progression de la viscosité dans le temps sont un des contrôles que peut exercer le mouleur sur la matière. De plus, la matière doit être gardée dans des entrepôts réfrigérés et n'être sortie que quelques heures avant le moulage.

Un SMC trop "frais" et à trop basse viscosité ne donnera pas une bonne "contre-pression" au moulage et la qualité de la pièce sera mauvaise. A l'inverse un SMC de très haute viscosité causera de sérieux problèmes sur le remplissage du moule et sur la qualité des lignes de soudure.

Selon les matériaux, la viscosité de la pâte "acceptable" pour le moulage, se situe entre 4 et 20 millions de Cps.

Outre la viscosité, quelques-uns des contrôles que le mouleur peut faire sur les matériaux sont:

- Inspecter l'uniformité du mélange verre/pâte et l'absence de zone de verre non "mouillé".

- Contrôler le pourcentage de verre, par lavage au solvant ou pyrolyse.

- Déterminer le temps de cure, par des moulages de plaque sur une presse de laboratoire.

FACTEURS DE CONTROLES RELIES AU PRODUIT MOULE

QUALITE DES SURFACES

Ces facteurs sont liés à la formulation du mélange, qui peut être de type "low profile" et aux conditions de moulage, telles que: la température des moules, le niveau de polymérisation et la pression de moulage.

DEFORMATIONS DE LA PIECE

Malgré des conditions de moulage bien ajustées, certains designs de pièces favorisent les gauchissements. Ceux-ci proviennent entre autres, des sections d'épaisseurs non uniformes, les zones plus épaisses refroidissant plus lentement que les minces, ce qui créé des distorsions.

Une des techniques pour pallier à ces inconvénients est d'utiliser des conformateurs qui bloquent la pièce durant son refroidissement.

La fabrication des conformateurs, qui peuvent être en bois, en métal ou en résine, exige toutefois un minimum d'essai/erreur. Chaque type de pièce exigeant un système de conformateur spécifique.

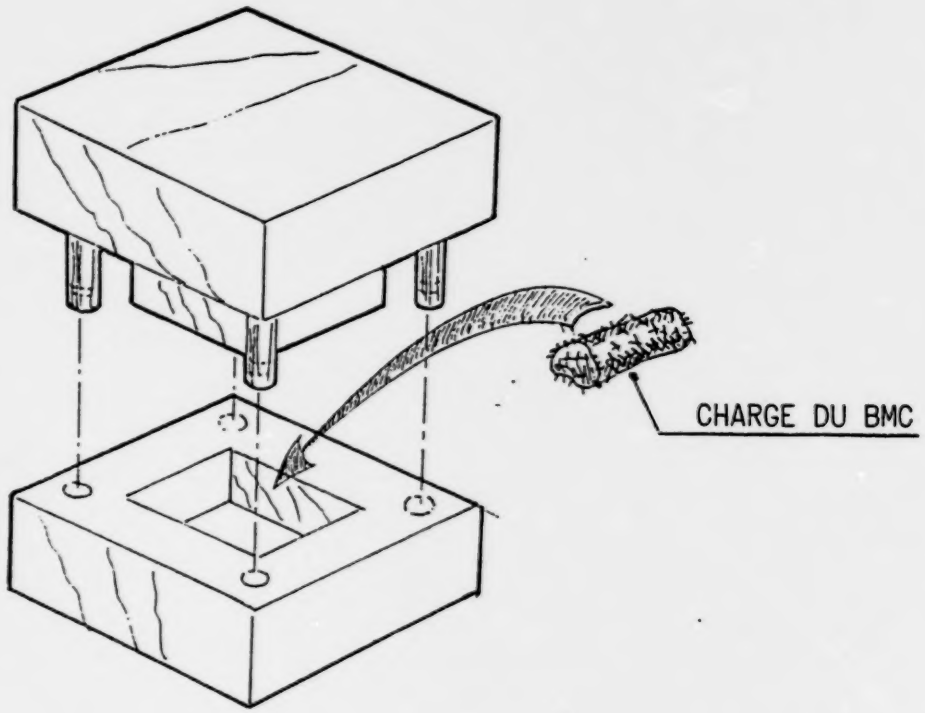
ASPECT STRUCTURAL

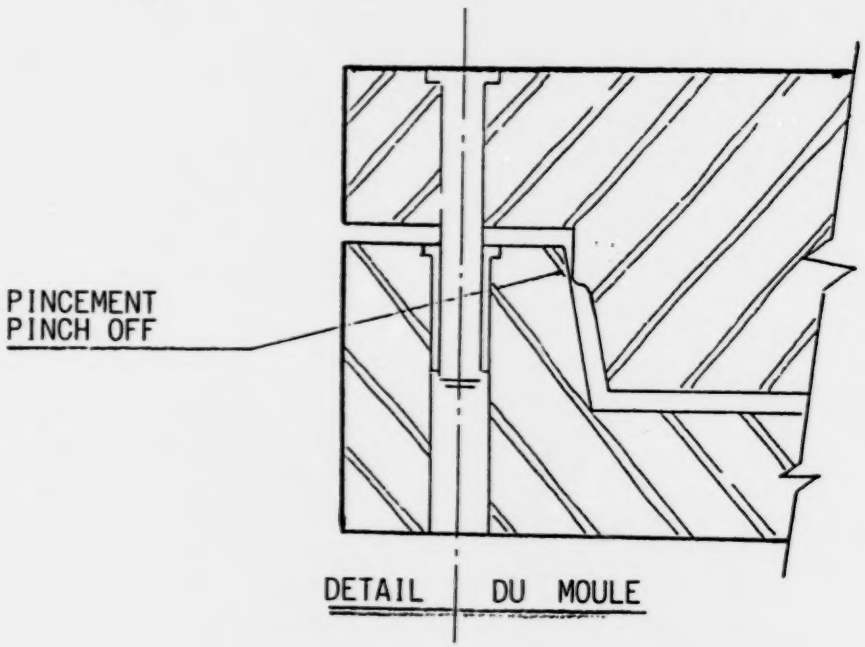
Cet élément est en partie lié aux lignes de soudure, qui sont fonction du patron de charge et de la répartition de la matière après le moulage.

Les lignes de soudure sont relativement faciles à détecter visuellement et une attention particulière doit être apportée pour les déplacer dans des zones moins critiques.

La modification des lignes de jonction peut être faite en modifiant la configuration et la grandeur du patron de chargement du moule.

SCHEMA DU MOULAGE PAR COMPRESSION DU "BMC"





DETAIL DU MOULE

MOULES POUR LE MOULAGE PAR COMPRESSION

CONFIGURATION GENERALE

Les moules à compression doivent supporter des pressions pouvant, dans certains cas, dépasser 8000 psi et subir des températures pouvant atteindre 450 F. De plus, les matières moulées peuvent être abrasives, telles celles contenant de la fibre de verre, ou corrosive, telle que les résines d'urée-formol.

Pour résister à ces conditions de moulage, les moules sont dans la grande majorité des cas faits de blocs d'acier usinés, dont certaines sections recoivent des traitement de surface.

Un autre élément particulier aux moules à compression, vient du fait qu'ils sont d'abord chargés de matière non compressée, celle-ci occupant un volume relativement plus grand que la pièce moulée.

A la fermeture du moule, cette matière ne doit pas chasser par le plan de joint, mais rester prisonnière au fond de la cavité où elle sera par la suite compressée.

Pour obtenir ce résultat, le périmètre des moules forme un pincement (pinch off), aux tolérances serrées, qui est créé par l'encastrement d'une portion de la section mâle dans la cavité. Ce profil télescopique, agit un peu avant la fermeture complète du moule et empêche la pâte de fuir par le plan de joint.

Cette particularité des moules à compression, se traduit par trois types moules:

- MOULE POSITIF
- MOULE SEMI-POSITIF
- MOULE A COUTEAU (FLASH MOULD)

MOULES POSITIFS

Ces moules agissent comme des pistons qui descendent au fond de la cavité. La matière placée au fond de la cavité est compressée à son maximum, le taux de compression étant défini par la force du vérin.

Le pincement de la section télescopique, laisse évacuer l'air dans la cavité, mais très difficilement le surplus de matière.

Ce type de moule exige un dosage précis de la matière afin d'éviter des variations épaisseur du produit fini. Par contre, il assure une densité maximum du produit moulé, ce qui convient bien aux applications diélectriques.

MOULES SEMI-POSITIFS

Les moules semi-positifs sont une courte section positive, mais derrière celle-ci il y a une zone de décompression facilitant quelque peu l'évacuation du surplus de matière.

Dans ce type de moule, l'épaisseur de la pièce est fixée par une butée, autour du plan de joint. Le dosage est donc un peu moins critique et les surcharges de 2-5% peuvent être tolérées.

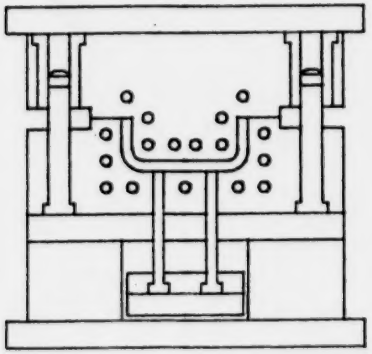
Par contre, la matière n'étant pas nécessairement compressée à son maximum, il peut en résulter une densité moins grande de la pièce et un risque de porosité. Ceci n'étant pas souhaitable pour les applications électriques.

MOULES A COUTEAU (FLASH MOULD)

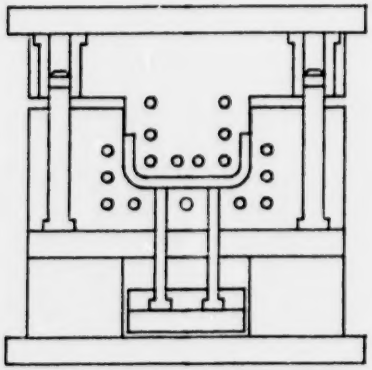
Contrairement aux deux autres types, ces moules ne sont pas télescopiques, les sections mâle/femelle se déposant l'une contre l'autre, à la manière des moules pour injection.

Ils sont surtout employés pour les matériaux ayant relativememt peu de variation de volume comme c'est le cas lorsque les matières sont misesen pastilles avant d'être moulées.

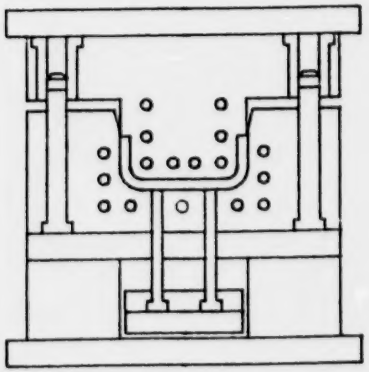
TYPES DE MOULES
A COMPRESSION



MOULE A COUTEAU



MOULE POSITIF



MOULE SEMI-POSITIF

MATERIAUX POUR LES MOULES

CONSTRUCTION

Qu'il s'agisse des SMC et BMC, qui se moulent à des pressions de 800 à 1500 psi, ou des autres compounds thermodurcissables, dont les pressions de moulage se situent entre 3000 et 8000 psi, ces conditions sévères imposent l'acier usinée, comme étant le meilleur choix pour la fabrication des moules à compression.

De plus, le matériel doit pouvoir résister à l'abrasion provenant du matériau, des charges et des renforts qu'il contient.

Enfin, les tolérances d'ajustement des pincements et des sections mobiles, font en sorte que l'acier usiné soit nécessaire pour les rencontrer.

Les aciers de types P-20, sont généralement les meilleurs pour ce genre d'application. Bien qu'ils s'agissent d'un grade d'acier coûteux, ils permettent de produire de grandes séries avec une bonne tenue.

Le grade d'acier 4140 est acceptable, mais il peut présenter quelques porosités. Les aciers au carbone, grade 1040 et 1045, sont acceptables mais moins performants en qualité de surface.

FINI DE SURFACE

Un enduit de chrome d'une épaisseur de 0.0005" à 0.001", facilite le démoulage et réduit les risques de taches dans la pièce, dues à l'abrasion sur le moule.

Cependant, la mise au chrome est une opération délicate et qui ne doit être faite qu'après que le moule ait été testé en pré-production.

Les retouches sur un moule chromé sont presque impossibles et nécessitent une reprise totale du chrome, ce qui est parfois difficile à faire.

REGLES DE DESIGN ET STANDARDS

PINCEMENT (PINCH OFF)

Pour le moulage du SMC, la profondeur du pincement est d'environ 1/2" de profond et sa largeur est de 0.002" à 0.004". Le détail du pincement joue un rôle important dans la qualité de la pièce moulée. Il doit assurer une bonne ventilation de la pièce tout en permettant une bonne contre-pression sur la charge.

DEMOULAGE

Les moules doivent avoir des angles de démoulage, généralement la norme est de 1 degré d'angle. Cette norme doit être plus forte pour les sections texturées, soit environ 1 degré additionnel, par 0.001" de profondeur de texture.

Le démoulage peut être fait par des tiges d'éjection, actionnées à l'ouverture du moule et qui dégagent la pièce de la cavité ou du mâle.

Les tiges d'éjection sont normalement localisées sur la face non apparente de la pièce. Si la pièce colle sur le côté du moule ne portant pas les tiges d'éjection, elle peut y être retenue par de petites rainures en contre dépouille.

CHAUFFAGE

Qu'il soit chauffé par des crayons électriques, par de l'huile chaude ou de la vapeur d'eau sous pression, la température des moules doit être contrôlée avec précision. Les températures du mâle et de la femelle étant maintenues avec un écart d'environ 10 F.

La température doit être uniforme sur chaque portion du moule, de manière à permettre une polymérisation complète et régulière.

MATERIAUX THERMODURCISSABLES

ALLYL

Les esters allyliques peuvent servir de monomères pour réagir avec les polyesters ou être utilisés sous forme de compound moulable par compression. Parmi les différentes résines pouvant être formulés à partir des Allyls, il y a:

- Diallyl phtalate (DAP)
- Diallyl isophtalate (DAIP)
- Diallyl naphtalate (DAN)

Le DAP est le plus connu et le plus utilisé des trois. Toutefois, ces grades de compounds demeurent relativement peu employés et ce à cause de leur coût plus élevé.

Les DAP ont une bonne tenue diélectrique en milieux humides et ils offrent une excelente résistance à l'arc ou au "tracking".

Compte tenu de leurs propriétés, on utilise les DAP surtout pour des applications électriques sévères et dans des environnements difficiles.

Parmi les développements faits avec des DAP hautes performances, notons que certains grades, peuvent produire des pièces dont le module en flexion peut atteindre 3.7 x 10^6 psi. et qui a un HDT de plus de 555 F.

AMINOPLASTES

Ces résines sont obtenues par la réaction entre le formol et l'urée ou la mélamine. Ces systèmes d'urée-formol ou de mélamine-formol, polymérisent en présence d'un catalyseur acide.

Une des caractéristiques de ces résines est leur transparence et leur facilité à être pigmentée dans une large gamme de teintes.Diverses charges peuvent aussi leurs être incorporées, pour produire des compounds aux propriétés spécifiques.

UREE-FORMALDEHYDE

Ces poudres à mouler donnent des pièces ayant une bonne résistance à l'abrasion et une grande dureté de surface. Elles peuvent être transparentes ou pigmentées, ont une bonne tenue aux U.V. et sont auto-extinguibles. Enfin, les résines d'urée-formaldéhyde sont économiques.

Par contre, elles ne sont pas approuvées pour des applications alimentaires, ont un retrait important au moulage et elles sont sensibles à l'eau bouillante.

MELAMINE FORMALDEHYDE

Ces compounds offrent les mêmes avantages que les résines d'urée-formaldéhyde, mais souvent à un plus haut degré. De plus ils sont utilisables dans le domaine alimentaire et ont un faible retrait.

Cependant, les résines mélamines, sont plus dispendieuses que les résines d' urée-formaldéhyde.

EPOXY

Les époxys sont reconnus pour leurs propriétés mécaniques élevées, leur résistance chimique et leur bonne tenue diélectrique. De plus, les époxys ont un faible retrait et peuvent être utilisés à haute température.

Cependant, le coût des époxys est relativement élevé, ce qui en limite l'usage aux seules applications critiques.

Les époxys sont généralement chargés de fibres de verre, de manière à assurer de meilleures propriétés mécaniques.

L'utilisation des compounds époxys dans le moulage par compression, est relativement limitée. On les retrouve sous forme de poudre à mouler, de granules ou de feuilles SMC.

Les poudres à mouler sont surtout employées dans la compression-transfert, pour la fabrication de pièces électriques.

Depuis quelques années, sont apparues des compounds sous forme de granules à fibres longues et même des SMC à base de résines époxys.

Les granules verre/époxy, sont pastillées et pré-chauffées, avant d'être moulées. Ces matériaux servent à la fabrication d'isolateurs, là où des résistances mécaniques et diélectriquessont requises.

Les SMC époxys ont l'avantage d'utiliser des fibres de verre plus longues que dans les époxys en granules et de ce fait, ils peuvent atteindre de meilleures performances mécaniques.

PHENOLIQUES

Les phénoliques sont produits par la réaction d'un phénol et d'un formol. Cette polycondensation donne un sous-produit, l'eau, qui doit être évacuée lors du moulage. Ces matériaux, dont l'origine remonte au début du siècle, sont parmi les plus anciens plastiques commercialisés.

Ce sont des produits économiques et relativement faciles à mouler et qui se présentent sous un large éventail de formulations et de grades. Pour la fabrication de compounds, les phénoliques peuvent être chargés de farine de bois, de mica, de coton, d'amiante ou de fibres de verre.

Les phénoliques sont réputés pour leur bonne tenue en température, supérieure à 300 F, leur faible retrait et leur grande stabilité dimensionnelle. Enfin, ce sont des résines auto-extinguibles.

Parmi les défauts des phénoliques, il y a leur limitation de teinte aux seules couleurs foncées, leur mauvaise tenue en milieu humide et leur mauvaise résistance à l'arc.

On retrouve souvent les phénoliques dans les produits pour usages diélectriques ou ceux exposés à la chaleur, tels que: des pièces de grilles-pains, des poulies, des contacteurs ou des cendriers.

La restriction sur l'utilisation de l'amiante, utilisée avec le phénolique pour en améliorer la tenue en température, est un facteur qui a contribué à une baisse sensible de l'utilisation de ces compounds.

Par contre, on cherche à prendre avantage de la bonne tenue au feu des phénoliques en visant la fabrication de pièces d'habillage pour des véhicules de transport public.

Pour y arriver, les fournisseurs sont à mettre au point des SMC-phénoliques, à renforts longs, qui offrent à la fois des propriétés structurales, une facilité de mise en oeuvre et qui surtout ont une bonne tenue au feu.

POLYESTER

Les polyesters insaturés sont formés à partir d'un diacide saturé, un diacide insaturé et un glycol. Le composé ainsi obtenu est mis en solution dans un monomère, généralement de styrène.

L'action d'un catalyseur à base de peroxyde, enclenche une réaction par polyaddition dans le système polyester/monomère, qui entrainera la solidification du thermodurcissable.

Les polyesters sont les plus largement utilisés des compounds de moulage par compression. Ce sont des matériaux économiques, relativement faciles à mouler et qui peuvent être mis en forme à des pressions inférieures à celles des autres types de compounds moulés par compression.

Les résines polyester, sont généralement de type orthophtalique, isophtalique ou biphénol.

Les polyesters orthophtaliques représentent le type le plus commun et le plus économique.

Le grade isophtalique permet de rencontrer des normes physico-mécaniques plus élevées et il offre une meilleur tenue chimique que les orthos.

Enfin, la catégorie biphénol est celle des résines ayant les meilleures propriétés chimiques.

Les polyesters insaturés sont presque toujours employés avec des renforts de fibres de verre, sinon leurs performances mécaniques seraient trop faibles. Selon le mode de renfort et le grade de résine utilisée, les polyesters peuvent offrir un large éventail de propriétés.

Les polyesters moulés par compression, se retrouvent dans trois familles, qui à leur tour se fragmentent en une foule de variantes:

- Famille des Mat/résines liquides
- Famille des BMC
- Famille des SMC

MAT/RESINE LIQUIDE

Cette technique de moulage est connue sous le terme de Matched Die Molding. La fibre de verre est déposée à sec contre le moule, après quoi, la pâte de polyester est versée. La pression lors de la fermeture du moule, force la résine à imbiber le renfort et à prendre la forme de la cavité. La chaleur enclenche l'action des catalyseurs, qui provoquent la polymérisation en quelques minutes.

Les pâtes polyesters contiennent des charges, telles que du carbonate de calcium ou de l'hydrate d'alumine. La première servant à réduire le coût, alors que la deuxième améliore la tenue au feu. Les pigments, les agents de démoulage et les catalyseurs sont aussi ajoutés au mélange.

Cette technique est bien adaptée aux pièces de grandes dimensions, mais elle est remplacée par le SMC. Ce dernier système est plus propre, il a des propriétés plus constantes et il n'implique pas la préparation de tissus de renforts ou de préforms.

BMC

Le terme BMC signifie "Bulk Molding Compound". Il est aussi appelé Prémix ou DMC. C'est une pâte polyester, qui contient en plus des charges, des pigments et des catalyseurs, les fibres nécessaires au renfort de la pièce.

Le pourcentage de fibres de verre dans le BMC est entre 15% et 25% et la longueur des fibres varie de 1/4" à 1/2".

Les BMC sont préparés dans des mélangeurs mécaniques, d'où ils sont extrudés sous forme de gros boudins. Les BMC peuvent être moulés par compression, mais on les utilise souvent par transfert ou par injection.

Le moulage du BMC tend de plus en plus à passer de la compression à l'injection. D'ailleurs la technique du ZMC est une méthode de moulage regroupant, machines et matériaux spécifiquement conçus pour l'injection.

SMC

SMC signifie "sheet Molding Compound", comme ce nom l'indique, le système se présente sous forme de feuilles prêtes à être moulées.

Ces feuilles font environ 1/8" d'épaisseur par 24"à 48" de large et sont en rouleau de plusieurs dizaines de pieds de long.

Le SMC contient la pâte de polyester avec ses charges et additifs, ainsi que le renfort en fibres de verre, dont la longueur moyenne est de 1".

La mise au point du SMC fut possible grâce à la maîtrise du phénomène d'épaississement des polyesters, sous l'effet du MgO. Cet additif, ajouté à la pâte de SMC en augmente la viscosité au point où celle-ci peut atteindre plusieurs millions de Cps.

Comme les BMC, les SMC contiennent des charges telles que le CaCo3, qui en réduisent le coût, de même que des agents démoulants et des catalyseurs.

Une des caractéristiques des SMC et qui peut aussi s'appliquer aux BMC, c'est l'incorporation d'additifs "low profile".

Il s'agit ici de granules thermoplastiques qui lors de la polymérisation à chaud, prennent de l'expansion et compensent le retrait de la résine. Il en résulte une photographie de fibre à peu près nulle et une meilleure uniformité de surface.

Une formulation typique de SMC contient les éléments suivants:

INGREDIENTS	PARTIE EN POIDS
- Polyester	100
- CaCo3	100
- T-Butyl Perbenzoate	1
- Zinc Stereate	2
- MgO	5

Contenu de verre en filaments de 1" de longueur, 28% du poids total "verre/pâte".

Il existe plusieurs variantes au SMC, dont les principales sont:

HMC

Il s'agit d'un SMC à haute teneur en verre, celui-ci pouvant atteindre jusqu'à 65%. Les HMC permettent donc de produire des pièces ayant des caractéristiques mécaniques plus élevées.

Cependant, celles-ci sont souvent obtenues au détriment de la facilité de moulage et de la qualité du fini de surface.

XMC

Alors que le SMC est préparé à partir de fibres distribuées de manière isotropique, le XMC contient des fibres orientées et qui peuvent être en continu.

Pour obtenir un tel patron, le XMC est fait sur un équipement identique à celui utilisé pour l'enroulement filamentaire. Les fils de verre passent dans un bassin d'imprégnation et s'enroulent sur un mandrin. Lorsque le bobinage est complété et que la viscosité du XMC permet le "démandrinage" le XMC est coupé et enlevé du mandrin. Il en résulte une feuille contenant de la fibre orientée en fonction de l'angle d'enroulement.

Le XMC sert pour des applications spécifiques où il faut obtenir une résistance mécanique dans un axe défini.

TMC

C'est une sorte d'hybride entre le SMC et le BMC, d'ailleurs le TMC se prête au moulage par compression, injection ou tranfert.

Il consiste en un SMC de forte épaisseur (jusqu'à 2"), dans lequel les fibres longues peuvent avoir une orientation dans les trois axes. Au dire des promotteurs de la technique, le TMC permet de meilleures performances mécaniques.

POLYESTER DE TYPE ALKYD

Ce sont des polyesters insaturés ayant une faible teneur en monomères styréniques. On les retrouve sous forme de granules sèches ou en briquettes. Chargés de verre les alkyds ont une bonne résistance électrique et au "tracking", mais leur tenue à l'impact est relativement faible.

Ils se moulent comme des polyesters standards et parmi leurs applications se retrouvent le moulage des plats pour fours micro-ondes ou dans les boitiers et contacteurs électriques.

SILICONE

Les silicones servent au moulage de composantes pour application à haute température, car ils résistent jusqu'à 600 F en continu. Ce sont des résines non toxiques, ayant une bonne tenue chimique, une bonne résistance à l'oxydation et ayant une grande résistance électrique.

Les silicones sont toutefois perméables aux gaz et leur prix demeure élevé. Les applications types se retrouvent dans les secteurs médicaux ou de l'aérospatiale.

POLYIMIDE

Les polyimides thermodurcissables peuvent être chargés de verre ou de fibres de carbone et être moulés par compression. Ce sont des matériaux à haute performance, qui servent surtout dans les applications militaires ou aérospatiales.

Les polyimides n'ont pratiquement pas de fluages et résistent à de hautes températures (jusqu'à 900 F pour une courte exposition. Enfin ils ont une bonne tenue au froid, jusqu'à -320 F. Cependant, en plus d'une mauvaise tenue électrique et d'une faible résistance à l'oxydation, ce sont des matériaux très coûteux.

FICHE DE MATERIAUX

COMPOUND

DIALLYL PHTALATE (DAP)

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 2000-6000
RETRAIT	(po x po)	: 0,001-0,007
TEMPERATURE	(°f)	: 290-380

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	RESISTANCE MECANIQUE
MINERALE	

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,65-1,98
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 5000-11 000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 1000-1500
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,3-15
HDT	(à 264 psi)	: 330-550

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- TENUE DIELECTRIQUE EN MILLIEU HUMIDE	- COUTEUX
- BONNE RESISTANCE A L'ARC ET AU TRACKING	

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
CANADIAN OXY	(CDN) (416) 871-3206
ROGERS	(USA) (203) 646-5500

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

3,50-7,00

FICHE DE MATERIAUX

COMPOUND D'UREE FORMALDEHYDE

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 2000-20 000
RETRAIT	(po x po)	: 0,005-0,008
TEMPERATURE	(°f)	: 275-350

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	RESISTANCE MECANIQUE
CELLULOSE	STABILITE DIMENSIONNELLE
MICA	RESISTANCE ELECTRIQUE

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,47-1,52
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 5500-13000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 1300-1600
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,25-0,40
HDT	(à 264 psi)	: 260-290

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- ECONOMIQUE	- RETRAIT IMPORTANT
- PIGMENTATION FACILE	- SENSIBLE A L'EAU CHAUDE
- DURETE DE SURFACE	- NON ALIMENTAIRE

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
REICHHOLD	(CDN) (416) 848-5540
FIBERITE	(USA) (602) 730-2251

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

0,90-1,15

FICHE DE MATERIAUX

COMPOUND DE MELAMINE

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 2000-20 000
RETRAIT	(po x po)	: 0,003-0,004
TEMPERATURE	(°f)	: 280-350

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	RESISTANCE MECANIQUE
CELLULOSE	STABILITE DIMENTIONNELLE
MICA	RESISTANCE ELECTRIQUE

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,47-2,0
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 5000-13 000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 1100-1200
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,2-18
HDT	(à 264 psi)	: 350-400

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- DURETE DE SURFACE	- PLUS COUTEUSE QUE LES RESINES D'UREE
- APPLICATIONS ALIMENTAIRES	
- FAIBLE RETRAIT POSSIBLE	
- PIGMENTATION FACILE	

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
REICHHOLD	(CDN) (416) 848-5540
FIBERITE	(USA) (602) 730-2251
BIP	(UK) (021) 552-1551

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

1,10-1,30

FICHE DE MATERIAUX

COMPOUND EPOXY

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 1000-5000
RETRAIT	(po x po)	: 0,000-0,010
TEMPERATURE	(°f)	: 250-350

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	RESISTANCE MECANIQUE
MINERAL	
CARBONE	
ARAMIDE	

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,30-1,95
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 8000-35 000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 1900-11 800
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,3-45
HDT	(à 264 psi)	: 350-500+

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- RESISTANCE MECANIQUE	- COUT ELEVE
- FAIBLE RETRAIT	
- RESISTANCE ELECTRIQUE	
- TENUE CHIMIQUE	

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
PREMIX INC.	(USA) (216) 224-2181
QUANTUM	(USA) (517) 496-2884
FIBERITE	(USA) (602) 730-2251

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

3,50+

FICHE DE MATERIAUX

COMPOUND PHENOLIQUE

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 1000-20 000
RETRAIT	(po x po)	: 0,001-0,009
TEMPERATURE	(°f)	: 220-380

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	RESISTANCE MECANIQUE
FARINE DE BOIS	ECONOMIE
AMIANTE	RESISTANCE CHALEUR
MICA	RESISTANCE ELECTRIQUE

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,37-2,00
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 3500-10 000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 700-3300
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,2-3,5
HDT	(à 264 psi)	: 300-600

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES

- AUTO EXTINGUIBLE
- FAIBLE FLUAGE
- ECONOMIQUE
- FAIBLE RETRAIT
- RESISTANCE A LA CHALEUR

INCONVENIENTS

- MAUVAISE RESISTANCE A L'ARC
- NON ALIMENTAIRE
- DIFFICILE A PIGMENTER

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
- CANADIAN OXY	(CDN) (416) 871-3206
- REICHHOLD	(CDN) (416) 848-5540
- FIBERITE	(USA) (602) 730-2251
- ROGERS	(USA) (203) 646-5500
- PLASTICS ENGINEERING	(USA) (414) 458-2121

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

FICHE DE MATERIAUX

COMPOUND POLYESTER
SMC-BMC

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 800-1500
RETRAIT	(po x po)	: 0,0002-0,004
TEMPERATURE	(°f)	: 270-330

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	RESISTANCE MECANIQUE

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,65-2,4
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 7000-25 000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 1000-2500
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 2,5-22
HDT	(à 264 psi)	: 320-400

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- ECONOMIQUE	
- BONNE TENUE MECANIQUE	
- FACILE A MOULER	

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
JET MOULDING COMPOUND	(CDN) (416) 686-1707
PREMIX	(USA) (216) 224-2181
BMC INC.	(USA) (312) 377-1065

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

1,10-1,50

FICHE DE MATERIAUX

COMPOUND POLYESTER ALKYD

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 2000-20 000
RETRAIT	(po x po)	: 0,001-0,010
TEMPERATURE	(°f)	: 270-350

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	
MINERAL	

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,6-2,3
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 3000-9500
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 2000
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,3-16
HDT	(à 264 psi)	: 350-500

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- RESISTANCE DIELECTRIQUE - RESISTANCE AU TRACKING	- RELATIVEMENT FAIBLE A L'IMPACT

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
CANADIAN OXY	(CDN) (416) 871-3206

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

1,00-1,50

FICHE DE MATERIAUX

SILCONE

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 500-6000
RETRAIT	(po x po)	: 0,001-0,004
TEMPERATURE	(°f)	: 280-350

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,87-2,05
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 4000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 2000
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,4-5
HDT	(à 264 psi)	: 600

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- RESISTANCE A LA CHALEUR	- COUT ELEVE
- NON TOXIQUE	- PERMEABLE AU GAZ

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
FIBERITE	(USA) (602) 730-2251

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

FICHE DE MATERIAUX

POLYIMIDE

MOULAGE

PRESSION	(psi)	: 500-5000
RETRAIT	(po x po)	: 0,0005-0,002
TEMPERATURE	(°f)	: 350-480

CHARGES

TYPES	PROPRIETES
VERRE	
GRAPHITE	

PROPRIETES

POIDS SPECIFIQUE		: 1,85-2,00
RESISTANCE TENSION	(psi)	: 14 000-21 000
MODULE FLEXION	(,000 psi)	: 2800-3100
IZOD IMPACT	(lb-pi / po)	: 0,4-22
HDT	(à 264 psi)	: 500

CARACTERISTIQUES

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- RESISTANCE MECANIQUE A HAUTE TEMPERATURE	- MAUVAISE RESISTANCE A L'ARC
- FAIBLE FLUAGE	- MAUVAISE TENUE A L'OXYDATION
- TENUE CHIMIQUE	- PRIX ELEVE
- RESISTANCE A L'USURE	

FOURNISSEURS

SOURCES	GRADES
FIBERITE	(USA) (602) 730-2251

$

COUTS BUDGETAIRE $ / lbs

REGLES DE DESIGN

Vue l'importance du SMC et du BMC dans la technique de moulage par compression, l'essentiel des règles de design énoncées dans ce chapitre, toucheront d'abord ces deux grades de matériaux.

Il faut toutefois noter que ces mêmes règles, s'appliquent largement aux autres matières thermodurcissables, moulées par compression.

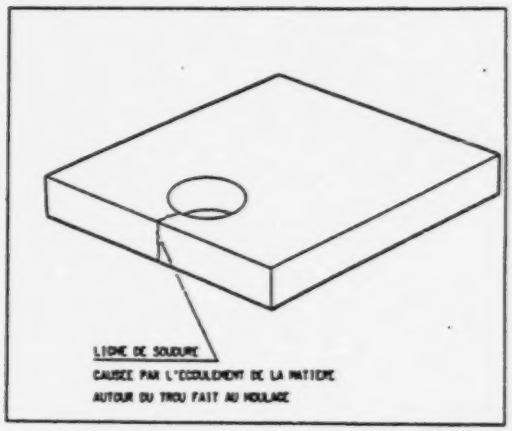
MOUVEMENT DE LA MATIERE

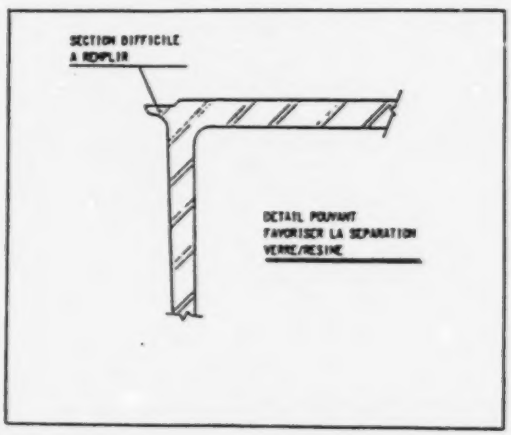
La configuration de la pièce doit tenir compte du mouvement de la matière dans le moule, lors de la fermeture de la presse.

Les fins détails et les sections trop petites peuvent causer des séparations verre/résine.

La matière se déplace dans le moule en contournant les obstacles et en formant des fronts qui se soudent en fin de course. Il importe que ces lignes de soudure ne créent pas de lignes de faiblesse.

Ces lignes de faiblesse peuvent être dues à une mauvaise jonction de la matière aux lignes de soudure ou par l'orientation de la fibre dans un axe particulier.



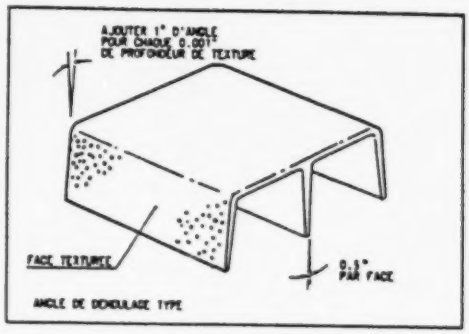


EPAISSEUR DES PIECES MOULEES

Pour des propriétés optimales, épaisseur des murs doit être entre 0.080" et 0.300".

Il faut éviter les trop fortes variations d'épaisseurs, car elles peuvent causer des gauchissements dus à un retrait non-uniforme.

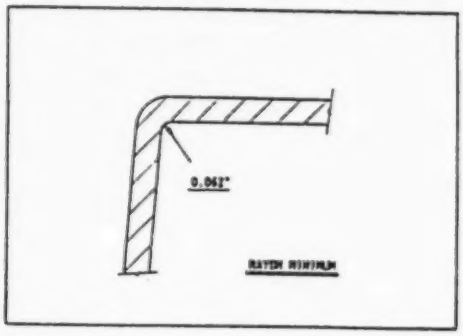
Règle générale, au lieu d'épaissir la section, il est plus économique d'ajouter des nervures au dos de la pièce.



ANGLES DE DEMOULAGE

Un angle de dépouille de 0.5 degré par face (1 degré total) est le minimum reccommandé.

Dans le cas des pièces ayant un fini texturé sur les faces verticales, il faut ajouter 1 degré d'angle de démoulage pour chaque 0.001" de profondeur de la texture.



RAYONS DE RACCORD

Pour faciliter le mouvement de la pâte et éviter les concentrations de résines, les rayons de raccord doivent être de 0.062" ou plus.

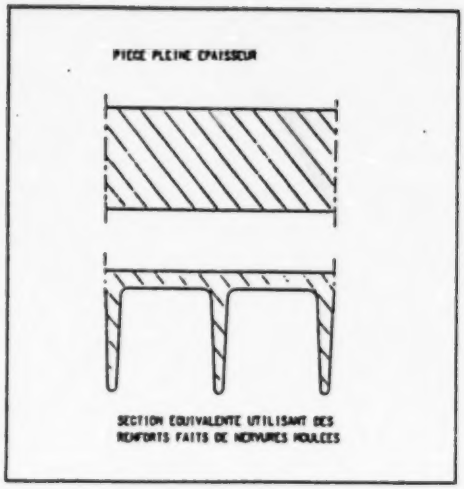
NERVURES ET MEMBRURES

Les nervures servent à renforcer la pièce. Leur localisation est critique sur l'apparence du produit, car les nervures causent des retassures qui affectent la qualité du fini de surface.

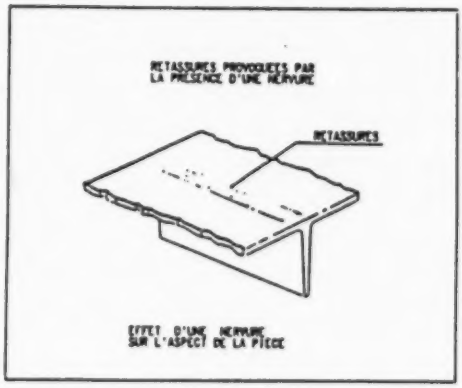
L'épaisseur de la nervure au point de contact, doit être égale ou inférieure à celle de la pièce.

Les rayons de raccord entre la nervure et la pièce doivent être le plus larges possible pour améliorer la résistance mécanique. Cependant, de grands rayons augmentent les retassures. Pour des pièces d'apparence, il y a donc intérêt à réduire les rayons au minimum.

En ce qui a trait à la hauteur des nervures, la règle veut que plus elles sont hautes, plus leur moulage et leur démoulage est difficile.



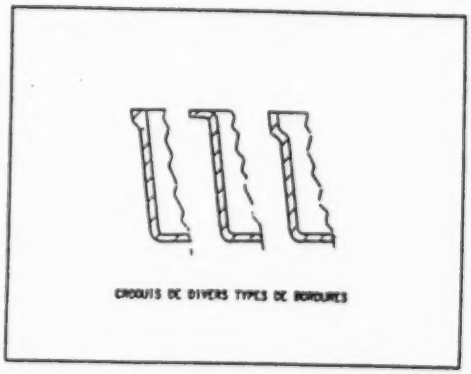
SECTION EQUIVALENTE UTILISANT DES RENFORTS FAITS DE NERVURES MOULEES



EFFET D'UNE NERVURE SUR L'ASPECT DE LA PIECE

BORDURES DES PIECES

Les bordures des pièces peuvent être plus épaisses afin d'en améliorer la résistance mécanique. Divers profils sont possibles, la règle étant de respecter la norme de dépouille pour démoulage.

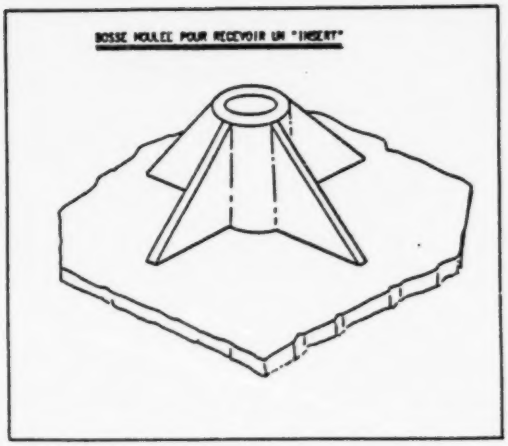

CROQUIS DE DIVERS TYPES DE BORDURES

BOSSAGE

Les bossages servent à l'inclusion d'inserts pour l'assemblage des pièces ou le montage des composantes.

Les règles de moulage sont les mêmes que pour les nervures.

Les bossages peuvent être de simples goujons ou être appuyés par un réseau de nervures qui améliorent leur tenue mécanique.



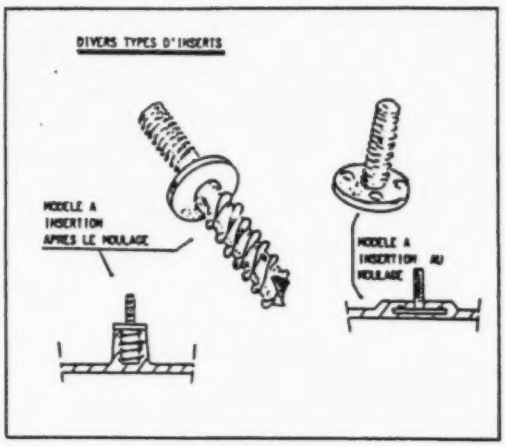
INSERTS

Les inserts métalliques fillettés, peuvent être moulés à même la pièce ou insérés en opération secondaire.

Les inserts moulés dans la pièce sont avantageux pour les montages impliquant de fréquents montages et démontages.

L'insertion d'inserts complique le processus de moulage et dans certains cas, les inserts ne peuvent être maintenus en place durant le moulage.

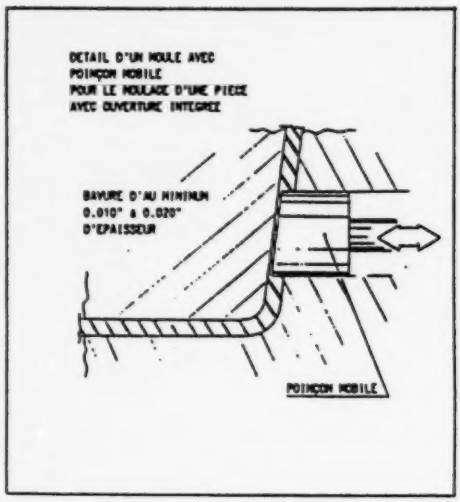
Les inserts placés en post-moulage, ont un filet tranchant, ce qui permet de les coincer dans les bosses moulées.

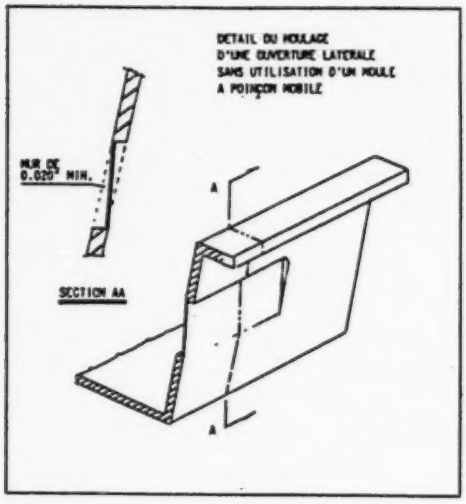


CONTRE DEPOUILLE ET OUVERTURES

Il est possible de produire des contre-dépouilles en utilisant des pointeaux mobiles.

Dans certains cas, il est possible d'éviter ces moules à sections mobiles en utilisant un profil de moules à sections en ciseau.





APPLICATIONS TYPES

PARE-CHOC POUR AUTOMOBILE

Certaines voitures Mercedez Benz et Audi sont équipées de poutres de pare-chocs moulées en SMC. Ces pièces utilisent une combinaison de HMC et de XMC pour permettre de produire des pièces rencontrant les normes d'impact à 4 MPH.

ROUE D'AUTOMOBILE EN SMC

Des tests poussés ont permis de valider l'utilisation du SMC pour la fabrication d'un roue d'automobile en composites.

Les matériaux de base sont le SMC et le XMC, ce dernier permettant d'obtenir un alignement de la fibre afin d'augmenter la résistance à la pression d'éclatement à plus de 230 psi.

Bien que le produit soit encore au stade expérimental, il s'avère très intéressant au point de vue de sa résistance mécanique,de son économie de poids et de sa bonne tenue à la corrosion.

PIECES DE CARROSSERIE

Le SMC est largement utilisé pour le moulage des composantes d'habillage, tels que des capots, des ailes ou des sections de toits. C'est un domaine où le matériel peut mettre à profit, sa tenue structurale, sa résistance à la chaleur et sa flexibilité de forme.

Les capots de voitures ou de camions, des sections de toits amovibles et des sections d'ailes, sont quelques-unes des pièces types moulées pour ce secteur. Des structures de portières sont aussi en cours de mise au point.

L'utilisation du "In-mould coating" est un facteur favorisant le développement de la technique du SMC pour le domaine automobile.

SIEGES MOULES

Qu'il s'agisse de sièges de stade, ou pour des voitures de transport public, les SMC rencontrent les performances mécaniques requises par ces produits.

Dans le cas des sièges de métro, les formulations SMC permettent de respecter les normes de feu et de fumée, typiques à ces domaines.

Les sièges des métros de Montréal, Mexico et New York, sont des exemples de telles applications. De plus, tous ces produits furent moulés au Canada.

COMPOSANTES ELECTRIQUES

C'est le domaine des BMC, phénoliques et DAP. Ces matériaux servent au moulage d'accessoires tels que des isolateurs ou des boitiers électriques.

Les SMC sont parfois utilisés pour des pièces plus grandes, tels que des lampes ou des coffres, de même que le moulage d'éléments d'antennes de réception et de certains capots de radar.

APPLICATIONS DOMESTIQUES

Le moulage de plats, pouvant passer directement du congélateur au four à micro-ondes, ou de cabarets et de contenants divers, se font en BMC ou en mélamine. Ces produits peuvent en effet rencontrer les normes "alimentaires", tout en offrant une bonne flexibilité de pigmentation.

Les SMC servent aussi à la fabrication d'éléments d'appareils électro-ménagers, tels que des cuves de lave-vaisselles.

PRODUITS RECREATIFS

La tenue mécanique du SMC le favorise pour la fabrication des coques de petits bateaux à moteur. De même, leur bonne tenue au froid est mise à profit pour des capots de motoneige. Comme dans le secteur automobile, les pièces subissent une finition à la peinture.

ANALYSE ET SIMULATION DU MOULAGE PAR COMPRESSION

Bien que des matériaux tels que les phénoliques, les mélamines et les DAP, représentent un secteur de marché non négligeable, leur moulage se fait souvent par transfert et par injection au lieu de la compression conventionnelle.

Les SMC représentent alors, la plus large part du moulage par compression. Compte tenu de cette situation, il faut donc considérer ce secteur, comme l'élément de base de toutes modélisations de la technique du moulage par compression.

Il faut toutefois préciser que la modélisation du SMC et du BMC favorisera aussi la compréhension des autres matériaux thermodurcissables et surtout ceux à fibres de renforts.

Ce chapitre présente les principaux facteurs d'influence, qui doivent être maîtrisés pour modéliser et contrôler le procédé, soit ceux reliés à l'écoulement de la matière.

ECOULEMENT VS LA MATIERE A MOULER

Le SMC est un compound intégrant plusieurs éléments associés mécaniquement. Les facteurs d'influence à ce niveau, sont: la spécificité de chacune des composantes du mélange, le dosage des ingrédients et l'uniformité de la pâte de SMC.

Cette uniformité de la répartition de la fibre, son isotropie de même que la viscosité résultant de l'action du MgO, sont quelques-unes des caractéristiques à contrôler.

En plus des différences au niveau de la formulation et des variations possibles dans un même lot, les ajustements en vue du moulage du SMC dépendent de la viscosité de la matière. Or, ce facteur varie en fonction du vieillissement de celle-ci.

COMPOSITION DU MELANGE

Le SMC doit avoir une répartition uniforme de la fibre et celle-ci doit être isotropique. Toutes tentatives de modélisation de la technique devront donc assumer que ces facteurs sont stables.

La qualité et l'uniformité de la matière sont un pré-requis pour obtenir un moulage de qualité. Ces paramètres pouvant être évalués en faisant un lavage de la résine, d'un coupon de SMC maintenu entre des tamis.

La longueur de la fibre est aussi un facteur qui doit être considéré dans la caractérisation du matériel, de même que le calibre de la fibre utilisée et la composition de ses agents liants.

Enfin, le mélange devra être caractérisé au niveau de sa formulation. Les charges, de par leur granulométrie, leur type, leur dispersion et leur dosage influencent la rhéologie du mélange et son comportement au moulage.

MATURATION DE LA MATIERE

La viscosité du SMC augmente progressivement au fur à mesure de son vieillissement. Cette modification, très rapide dans les premières heures, ralentit ensuite progressivement.

Le mouvement de la matière dans le moule et par conséquent la qualité de la pièce moulée sont influencés par la viscosité de la matière.

Un matériel à trop basse viscosité peut causer une séparation de phase dans le mélange, laissant des zones riches en résines. D'autre part, un compound à très haute viscosité peut causer des manques de matières, localisés.

Pour chaque type de matériel, il y a une fourchette de viscosité dans laquelle le matériel doit être moulé. A l'extérieur de cette zone, il faut revoir les ajustements du cycle ou le patron de chargement du moule et à la limite, le matériel ne peut être moulé convenablement.

ECOULEMENT VS LA PROCEDURE DE MOULAGE

Une procédure relativement simple pour caractériser le mouvement de la matière dans le moule, consiste à utiliser un mélange de SMC de différentes couleurs. Le produit moulé permet alors de facilement identifier les déplacements de la matière lors de la compression.

PATRON DE CHARGE

Dans le moulage du SMC par compression, la matière est d'abord découpée, pesée et placée sur le moule, immédiatement avant la fermeture de ce dernier.

La localisation et la forme du patron de charge sont des facteurs majeurs pour la qualité du produit. Selon la pièce à mouler, la surface couverte sur le moule doit faire entre 20% et 80%.

Le remplissage du moule, l'aspect de surface et la qualité des lignes de soudure, sont quelques-uns des éléments influencés par la localisation du patron de charge.

Un patron de charge trop petit en rapport à la surface du moule peut causer des porosités ou des brûlures. L'inverse peut être à l'origine de ligne d'écoulement, de gauchissement ou de séparation.

VITESSE DE FERMETURE

Plusieurs analyses sont en cours pour relier la vitesse de fermeture du moule à la qualité de la pièce. Ce facteur très important, peut affecter l'orientation des renforts, la qualité des soudures et le fini de surface.

Une vitesse trop rapide pouvant entre autre causer des brûlures sur le matériel, alors qu'une vitesse lente, favorise un pré-gel de la pâte durant la fermeture finale.

ECOULEMENT VS LE MOULE ET LA PRESSE

MOULE

Tel que précisé précédemment, le moule doit être maintenu à une température constante et uniforme, afin d'assurer une bonne qualité de surface et d'atteindre une polymérisation adéquate. Cette plage de température se situe normalement entre 280 et 320 F.

Au-delà de ce contrôle de température, la forme de la pièce a, bien entendu, un impact majeur sur l'écoulement de la matière. Sa configuration, sa taille, son épaisseur et la présence de nervures ou d'ouvertures faites à même le moule, sont autant de facteurs dont il faut tenir compte.

Règle générale, c'est en adaptant la forme et la localisation du patron de charge qu'on maîtrise les variables énumérées plus haut.

Dans certains cas, il est nécessaire de charger à plus d'un endroit, ou d'avoir un patron de charge d'épaisseurs variables. Il faut toutefois s'assurer que ces éléments n'ont pas d'effets négatifs sur la qualité des lignes de soudure.

La présence de nervures modifie l'écoulement de la matière et si celles-ci sont trop étroites ou très profondes, elles peuvent favoriser une séparation verre/résine.

La précision du pincement (pinch off), peut aussi affecter sensiblement l'écoulement de la matière. Une tolérance trop grande, surtout si elle est localisée, favorise une perte de matière ne permettant pas de bâtir une pression suffisante dans le moule.

Le pincement, doit donc être précis et uniforme. Cet espace, qui est normalement entre 0.002" et 0.004" pouvant par ailleurs être modifié par l'écart de température entre la femelle et le poinçon. Normalement ce dernier est maintenu 10 F au dessus de la température de la femelle.

PRESSE

La qualité de l'équipement affecte celle de la pièce moulée. Sa capacité de compression devant d'abord être adaptée à la grandeur de la pièce à mouler. La norme à cet égard étant de 800 à 1500 psi, dans la cavité, durant la compression.

Le contrôle de la vitesse de fermeture, lorsque la presse est en compression finale, est un élément influençant beaucoup l'écoulement de la matière dans le moule. Cette vitesse doit être uniforme et controlable avec précision.

Enfin, le parallélisme de la presse est un facteur ayant beaucoup d'impact sur l'aspect et la qualité de la pièce. Des plateaux non-parallèles produisent des écoulements préférentiels de la matière, des contre-pressions non-uniformes dans le moule et des pièces d'épaisseurs inégales.

POTENTIEL DE LA TECHNIQUE DE MOULAGE PAR COMPRESSION

Parmi les diverses techniques de moulage par compression analysées dans ce dossier, il apparaît que le SMC soit la technique majeure représentant le maximum de volume.

L'industrie automobile utilise de plus en plus largement ce procédé, surtout à cause des composantes structurales qu'il permet de produire.

Toutefois, l'avenir du SMC est lié en partie à l'amélioration de la qualité de surface. En effet, pour qu'il soit vraiment avantageux d'élargir l'utilisation de cette technique, les pièces doivent souvent permettre des finis automobiles de classe "A".

Cette amélioration du procédé passe par l'utilisation plus large des systèmes "In-Mould Coating" mais aussi par une meilleure compréhension des variables de cette technique.

De nombreuses études sont en cours afin de cerner les éléments du procédé et les dossiers relatifs à cette recherche en donnent de nombreux exemples.

Dans d'autres domaines du moulage par compression, il ne faut pas négliger le retour de certaines formulations à base de phénolique. Ces matériaux sont considérés pour des applications devant respecter des normes de feu/fumée/toxicité de plus en plus sévères.

Bien qu'il ne s'agit pas de compression à proprement parler, les moulages par transfert et par injection des thermodurcissables chargés de verres sont aussi des secteurs très prometteurs.

La compréhension du comportement rhéologique et de l'écoulement des systèmes à fibres longues, sont des éléments qui pourraient être très utiles dans la maîtrise des paramètres de moulage par injection des thermodurcissables.

POTENTIELS DES PROCEDES

Basées sur les informations publiées ces dernières années, de même que sur les conférences techniques présentées dans diverses conventions, les lignes de force qui apparaissent pour le procédé de compression sont les suivantes:

- ELARGISSEMENT DE L'UTILISATION DES SMC ET BMC
- MISE AU POINT DE NOUVEAUX MATERIAUX SMC
- AMELIORATION DES TECHNIQUES D'INJECTION (ZMC)
- MISE AU POINT DE NOUVEAUX COMPOUNDS THERMODUR.

ELARGISSEMENT DE L'UTILISATION DES SMC ET BMC

Ceci est en partie possible par l'amélioration des finis de surface et par les méthodes de In-mould coating. Ce qui permet d'utiliser plus largement les SMC dans le secteurs automobiles.

MISE AU POINT DES NOUVEAUX MATERIAUX SMC

Les formulations à base de résines phénoliques sont à se tailler une place dans les secteurs de l'aéronautique et du transport en commun. Ceci est dû à leur bonne tenue au feu.

Les SMC et BMC à base d'époxy ouvrent aussi la voie à des applications structurales dans le secteur électrique.

Enfin, les SMC à fibres orientées (XMC) et les SMC à haute teneur en fibre (HMC) sont quelques-unes des nouvelles formulations SMC qui élargissent le champ d'application du procédé de compression.

AMELIORATION DES TECHNIQUES D'INJECTION (ZMC)

Les SMC par compression doivent aussi compter avec un nouveau compétiteur, le ZMC.

Ce système, mis au point par le groupe St-Gobain permet d'injecter des compounds polyesters à fibres de verre de 1". Les avantages du produit fini sont aux niveaux de l'esthétique, du structural et surtout de sa rapidité de mise en oeuvre.

MISE AU POINT DE NOUVEAUX COMPOUNDS THERMODURCISSABLES

La relative fragilité à l'impact a longtemps été un obstacle contre certains compounds à base de phénolique. Depuis quelque temps, les fournisseurs offrent des grades ayant de meilleures propriétés et les produits moulés qui en résultent, grâce à leur performance et à leur coût reprennent de plus en plus de terrain perdu aux thermoplastiques.

L'arrivée de compound à base de phénolique, mais avec des colorations variées, ajoutent aussi à l'intérêt de cette résine.

MOULAGE AUTOCLAVE

DESCRIPTION GENERALE DU PROCEDE

HISTORIQUE

Depuis la commercialisation des résines de polyesters insaturées, au début des années 40, une foule de procédés de moulage furent mis au point pour le moulage des composites faits de fibres longues et de matrices résineuses.

Pour produire la pièce, les couches de tissus imbibés de résines doivent être laminées les unes sur les autres, contre la surface d'un moule. Cette opération peut être manuelle (moulage contact) mais de meilleures performances sont obtenues en assurant une pression plus forte et plus uniforme sur le laminé non polymérisé.

Cette dernière contrainte a permi la mise au point des techniques: "vacuum bag", "pressure bag" et "autoclave moulding". Tous ces procédés ont en commun l'utilisation d'une membrane appliquée contre le laminé et par le biais duquel une pression est appliquéesur le système renfort/résine durant sa polymérisation.

L'utilisation de pompes à vacuum et de fours, permet d'utiliser des matrices résineuses à haute performance, telles que cellesà base d'époxy, de bismaléimide ou de polyimide.

Ces derniers matériaux sont avantageusement utilisés sous forme de tissus préimprégnés appelés "prepregs". De cette façon ils peuvent être soigneusement calibrés de manière à permettre des laminages aux propriétés mécaniques élevées et uniformes.

Le moulage par autoclave est une technique bien adaptée aux prepregs. Ce système pouvant être rigoureusement contrôlé, il est devenu un standard pour le moulage des composites haut de gamme, utilisés dans les secteurs de pointe.

PROCEDURE DE MOULAGE

La technique de moulage par autoclave, comprend deux étapes principales: la séquence de mise sous vacuum et la cuisson en autoclave.

La mise sous vacuum consiste à déposer les tissus de renfort sur le moule, dans un ordre précis, pour ensuite les recouvrir de la membrane flexible qui servira à bâtir la pression sur le laminé, lorsque le vide sera fait entre le moule et la membrane.

La pièce est ensuite chauffée dans l'autoclave, ce qui enclenche la polymérisation. L'autoclave permet également d'augmenter la pression sur le laminé afin d'obtenir de meilleures performances mécaniques.

La température et la pression dans l'autoclave sont rigoureusement contrôlées, en fonction des caractéristiques de cuisson propres à chaque système de résines.

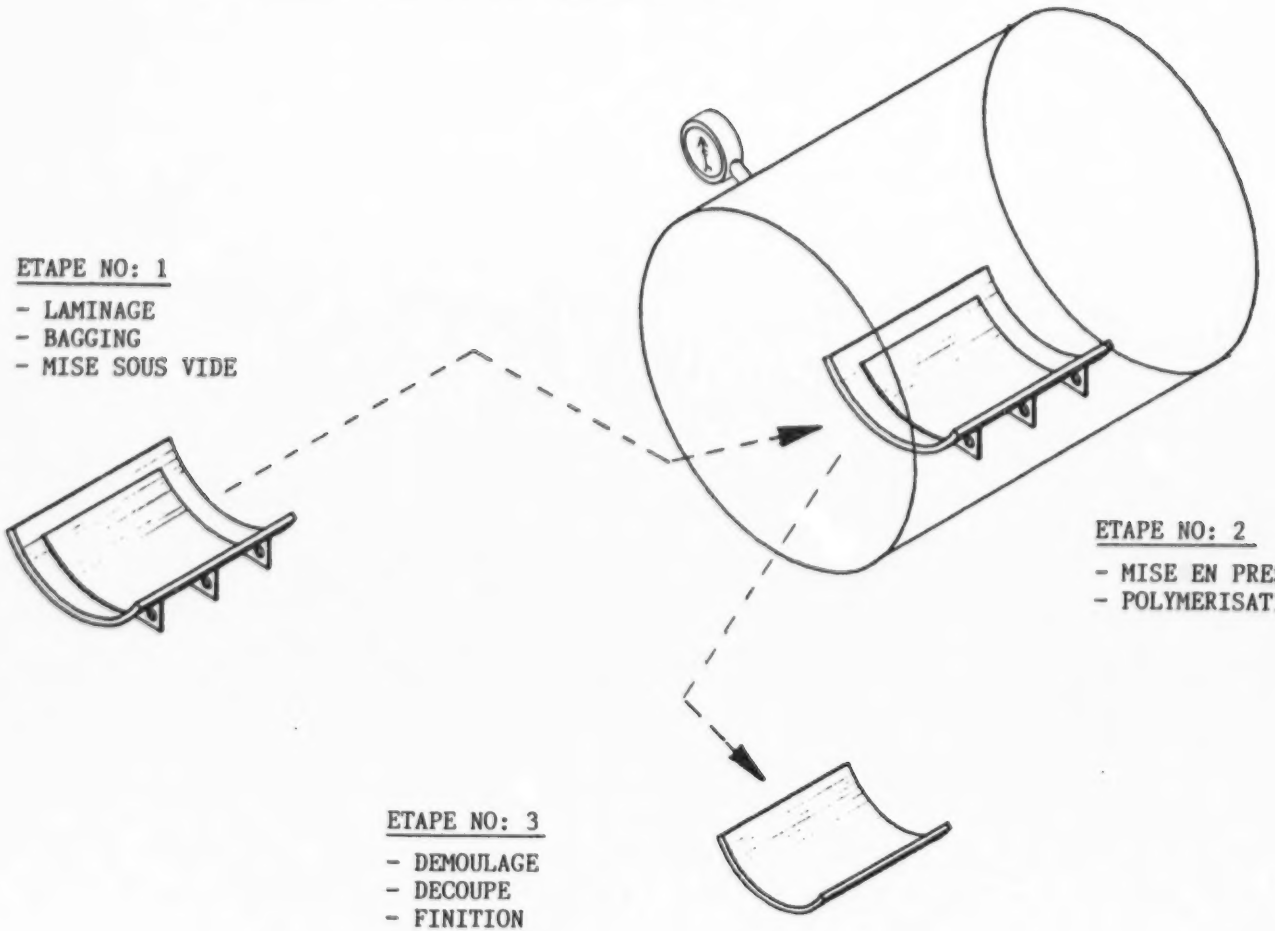
Une séquence typique de cuisson peut prendre de 3 à 6 heures à une température montant linéairement, ou par paliers jusqu'à 350 F et sous une pression de 100 à 200 psi.

En début de cuisson, la résine agit comme un liquide et sa viscosité diminue avec l'augmentation de la température. La pression assure une densification du laminé.

Après un certain temps, la résine entre dans la phase de gélification et sa viscosité augmente rapidement jusqu'à polymérisation du système. La température et la pression sont maintenues pour assurer une cure complète.

Pour une pièce de qualité, il importe de suivre rigoureusement le patron de cure recommandé pour le système de résines employé. Aussi, l'autoclave doit être muni d'appareils permettant d'enregistrer et de contrôler les diverses étapes de la cure. Généralement, des thermocouples sont fixés dans le laminé, pour suivre l'évolution de la température au niveau du laminé.

SEQUENCE DE MOULAGE EN AUTOCLAVE



ETAPE NO: 1

- LAMINAGE
- BAGGING
- MISE SOUS VIDE

ETAPE NO: 2

- MISE EN PRESSION
- POLYMERISATION A CHAUD

ETAPE NO: 3

- DEMOULAGE
- DECOUPE
- FINITION

POSSIBILITES ET LIMITES DU PROCEDE

La technique du moulage par autoclave est la seule adaptée au moulage de composites sandwichs à haute permformance.

Elle permet de polymériser à chaud et sous forte pression, ce qui assure une polymérisation complète et une bonne compaction du laminé.

La fabrication des structures sandwichs, faites avec des peaux de prepregs et des noyaux en nid d'abeilles est une des applications typiques au moulage par autoclave.

Cette technique de moulage est devenue une composante standard de toute usine de fabrication aéronautique.

En plus de servir au laminage des tissus prepregs elle sert aussi à la fabrication de composantes faites de feuilles métalliques collées à l'époxy. Certaines pales d'hélicoptère sont un exemple de ce type de système.

Par contre, la technique a des limites dont il faut tenir compte. La méthode est très lente et implique, pour être bien faite, des procédures complexes et des équipements coûteux.

Au niveau des procédures, le laminage des peaux et la mise en sac (Bagging), sont des opérations délicates qui exigent un long entrainement. Des équipements robotisés permettent d'automatiser certaines opérations de laminage, mais ces systèmes coûteux sont toujours adaptés aux composites haute gamme.

D'autre part, les autoclaves sont des équipements coûteux et dont l'opération est délicate. Ils doivent de plus être munis d'appareils permettant un contrôle précis de la séquence de cuisson.

Pour toutes ces raisons, il est peu probable que la technique s'élargisse à des produits autres que les avions ou les composantes structurales à haute performance.

EQUIPEMENTS POUR LE MOULAGE PAR AUTOCLAVE

EQUIPEMENT DE BAGGING

Les équipements de cette catégorie et qui seront décrits plus loin dans ce dossier sont:

- Membrane flexible (Vacuum Bag)
- Feutres de drainage (Breather et Bleeder)
- Film de démoulage (Release film)
- Tissus porreux (Release fabric)
- Film d'arrachage (Peel Ply)
- Mastic (sealant)
- Cale d'étanchéité (Dam)
- Plaque de compression (Caul Plate)
- Démoulant liquide (Liquid Release Agent)
- Ruban adhésif (Pressure Sensitive Tape)

EQUIPEMENT DE CUISSON

Un autoclave comprend les éléments suivants:

1) Caisson dont le diamètre peut être de moins de 12" jusqu'à plus de 96", capable de supporter des pressions jusqu'à 200 psi.;

2) Système de chauffage pouvant permettre des températures de l'ordre de 350 F.;

3) Pompe à vide, pour la mise sous vacuum;

4) Système de pression par gaz inerte, capable de bâtir et maintenir la pression dans l'autoclave;

5) Appareils de contrôle permettant de programmer le cycle de cuisson et d'en suivre l'évolution.

Il faut noter que la mise au point de nouveaux matériaux impose parfois l'utilisation d'autoclaves pouvant atteindre des températures et des pressions beaucoup plus élevées que celles définies plus haut.

MOULES

Les moules pour moulage par vacuum bag et par autoclave sont relativement peu dispendieux, par comparaison aux moules pour moulage sous presse.

Ce sont des moules ne contrôlant qu'une seule face du laminé. (Type moule ouvert).

Les moules ne subissent pas de fortes pressions, du fait que celles-ci sont toujours appliquées par des systèmes à vide ou en autoclave, ce qui implique une pression "environnante" et non sur une seule face.

Les matériaux pour les moules peuvent être des époxys armés de fibre de renfort ou des matériaux métalliques, usinés ou coulés.

Pour les pièces aux tolérances serrées, il faudra tenir compte de l'expansion thermique du moule, qui peut être forte avec certains matériaux.

CONTROLES

Les contrôles sur la matière première touchent à sa composition, son niveau de pré-polymérisation et sa séquence de cure.

Le vieillissement du matériel est un facteur particulièrement sur la qualité du produit final. Les prepregs doivent être suffisamment "frais" pour assurer un minimum de fluage de résine entre les plis mais sans excès.

Durant le moulage, les contrôles portent sur l'évolution de la température et de la pression en fonction du temps. Ces trois éléments régissent l'essentiel de la polymérisation et de la qualité de la pièce.

Les contrôles sur les produits finis, portent sur l'analyse de la séquence de laminage, sur les propriétés mécaniques du produit, sur la résistance inter-laminaire des strates de laminé et sur les dimensions et tolérances de la pièce.

MATERIAUX

MATRICES

EPOXY

Pour les laminés haute performance généralement produits par autoclave, l'époxy est la principale résine employée. Elle a de bonnes propriétés mécaniques, une stabilité dimensionnelle et une tenue chimique.

BISMALEIMIDE

Cette résine à haute performance occupe un étroit créneau du moulage par autoclave. Comme l'époxy, elle est utilisée sous forme de prépreg. Cette résine dispendieuse, est utilisée dans des applications à haute température dans les secteurs de l'aéronautique militaire.

POLYIMIDE

Ces résines à haute permformance ont des propriétés mécaniques très élevées et une excellente tenue à la chaleur. Leur prix élevé en réserve l'usage aux applications haut de gamme. A titre d'exemple, certains polyimides peuvent subir des pointes de température jusqu'à 900 F et donnent des laminés ayant une résistance en flexion de l'ordre de 50,000 psi.

PHENOLIQUE

Relativement peu répendus, les prepregs phénoliques sont surtout utilisés pour la fabrication de pièces d'habillage lorsque les normes de feu/fumée et toxicité l'imposent.

POLYESTER

Le polyester, qui est un matériau plus économique, mais moins performant que la plupart des précédents, n'est pas utilisé pour le moulage par autoclave. Toutefois, il se prête bien au moulage par "vacuum bag" avec des résines liquides.

RENFORT

VERRE

De tous les renforts utilisés, c'est le plus économique. Sa performance est toutefois très acceptable pour de nombreuses applications structurales et il est largement utilisé avec la plupart des types de matrices.

Le verre se retrouve sous divers types, dont les principaux sont: C, E, S et S2. Ces grades se distinguent par leurs propriétés.

ARAMIDE

Ce renfort, surtout connu pour le grade commercialisé par la firme Dupont, sous le nom de KEVLAR, offre un module d'élasticité élevé et une bonne résistance en tension.

CARBONE

Cette fibre à haute performance, a un module d'élasticité élevé pour un poids spécifique relativement faible.

GRAPHITE

Il s'agit de fibres de carbone ayant subi une post-cuisson. En les rendant cristallines, ce traitement en améliore le module d'élasticité.

BORON

Ces fibres très coûteuses mais dont le module en tension est de 5 à 6 fois supérieur à celui du verre, sont faites d'un fil de tungstène plaqué à chaud, d'une vapeur de bore.

POLYETHYLENE LINEAIRE

Vendue sous le nom de "SECTRA", cette fibre est un polyéthylène linéaire cristalline de 95 à 99%. Cette fibre offre une résistance en tension très élevée pour un faible poids spécifique.

DOMAINE D'APPLICATION

REGLES DE DESIGN

Les contraintes de design applicables au moulage par autoclave ou par vacuum bag, sont semblables à celles pour le moulage contact.

Il faut cependant préciser que le moulage des prepregs permet un meilleur contrôle de la localisation et de la configuration des tissus.

Ceux-ci sont d'ailleurs souvent taillés par des systèmes robotisés, permettant une grande précision des patrons de laminage.

Il est ainsi relativement facile d'épaissir localement le laminé, en lui ajoutant une séquence de renforts. De plus ceux-ci peuvent être orientés en fonction des contraintes qu'aura à subir la pièce moulée.

Bien que le système soit fait sur un moule ouvert et qu'une seule face du laminé soit contrôlée par ce moule, le dos du laminé peut avoir un bon fini, selon le type de "bagging" utilisé.

La principale restriction quant aux dimensions des pièces, est imposée par la taille des autoclaves. Ces équipements étant très coûteux, ils sont généralement limités aux petites ou moyennes pièces.

En ce qui a trait aux formes, les autoclaves permettent de mouler des pièces complexes, qui dans certains cas, portent des contre-dépouilles.

Une des caractéristiques des sytèmes prepregs et autoclaves, est la facilité de mouler des composites sandwichs, avec des noyaux en nid d'abeilles. Les pressions uniformes permises par les autoclaves et la cuisson à chaud favorisent un bon collage des peaux sur le noyau.

CHAMPS D'APPLICATION

Le moulage par autoclave et sa variante du vacuum bag sont des techniques permettant de mouler des composites, à partir de tissus pré-imprégnés ou d'une combinaison "tissus/sec et résine/liquide.

Ces procédés se prêtent bien au moulage des composantes relativement grandes et dont les épaisseurs sont assez uniformes. Contrairement au moulage par compression en moule fermé, ils ne permettent pas de produire des sections complexes avec des nervures intégrées.

Par contre, le vacuum bag et le moulage par autoclave sont très bien adaptés au moulage des pièces sandwichs.

Mais la relative lenteur de ces techniques et leur fort taux de main d'oeuvre les limitent surtout à des applications où la résistance structurale ou la tenue en température sont des impératifs justifiant les coûts.

Toute une classe de matériaux haute performance, basés sur des résines époxys sont orientés uniquement sur le moulage par autoclave.

Les applications types pour ces matériaux et pour le moulage en autoclave sont:

- Composantes aéronautiques, telles que: ailerons, empennage, capots de moteur
- Composantes aérospatiales
- Pièces d'habillage pour des véhicules de sport pour la compétition

Compte tenu de l'évolution des matériaux et de la demande des marchés cités plus haut, il semble peu probable que les composites par autoclaves élargissent beaucoup leur champ d'activités à d'autres secteurs. A moins que ceux-ci n'exigent les performances propres à ces composites et qu'ils puissent en assumer le coût, ce qui ne peut être que pour de rares cas.

VARIANTES DU PROCEDE

Le moulage des thermodurcissables implique deux étapes de base:

- Mise en forme et compaction du laminé
- Polymérisation de la matrice

Les variantes du moulage par autoclave doivent assurer ces deux fonctions, leur spécificité étant dans le traitement de chacune.

VACUUM BAG MOLDING (POLYMERISATION EN ETUVE)

Ce procédé implique d'abord une séquence de "bagging" et une compaction par vacuum; ces étapes étant identiques au moulage en autoclave.

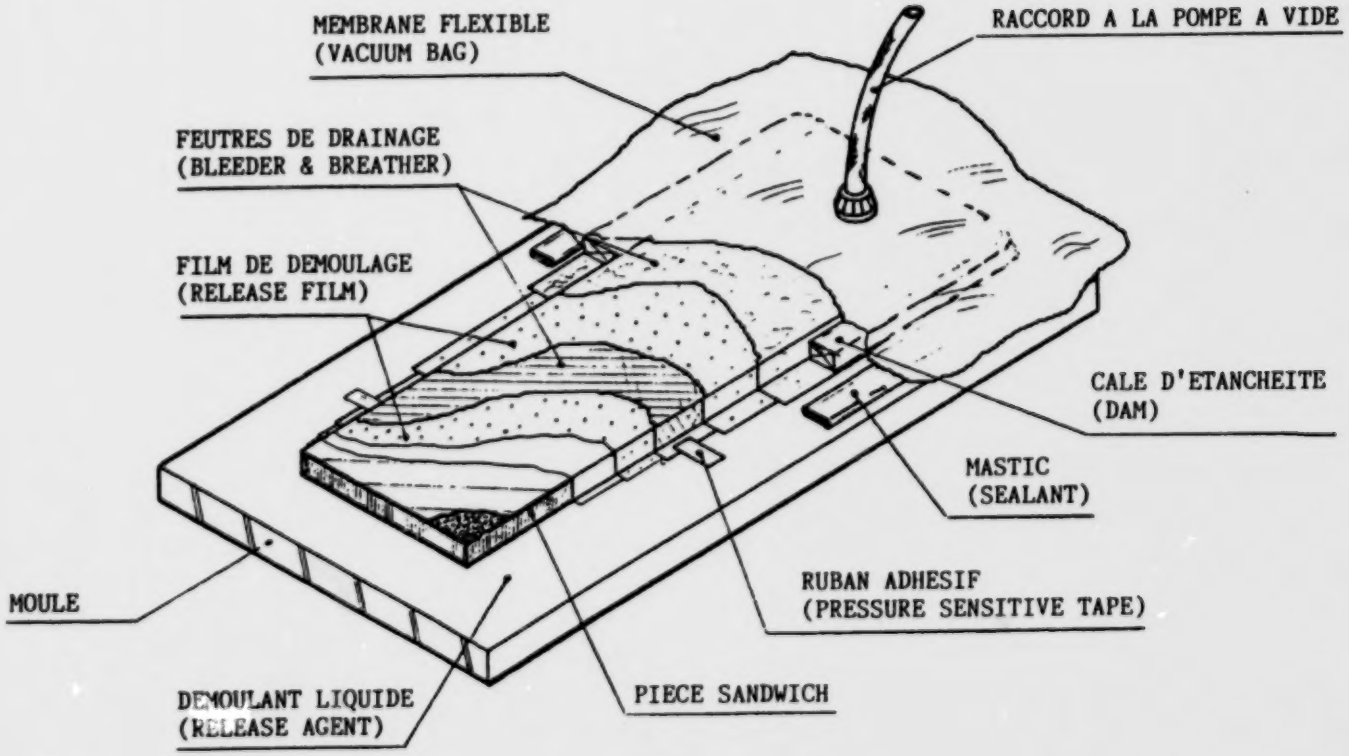
Cependant dans le vacuum bag, la polymérisation est faite en étuve et non en autoclave. La densification du laminé est alors limitée à la pression résultant du système de vacuum.

Comme un autoclave est un équipement très coûteux, le moulage par simple "vacuum bag" devient alors avantageux et plus accessible. Ceci est particulièrement intéressant pour les très grandes pièces, telles que des coques de voiliers.

Cependant, comme cette technique ne permet pas une grande densification du laminé, le produit fini n'a donc pas les mêmes propriétés mécaniques que celui fait par autoclave.

Avec certains systèmes de résines, tels que les polyesters, il est possible de mouler par vacuum bag et de faire la polymérisation à température ambiante. Ceci est particulièrement intéressant pour le moulage des laminés sandwichs, à base de verre/polyester. Cette procédure assure une meilleure adhésion des peaux sur le noyau.

PRINCIPE DE MOULAGE PAR VACUUM BAG



PRESSURE BAG MOLDING

Ces techniques et leurs diverses variantes, sont des systèmes moins répandus. Ils sont généralement adaptés à des produits particuliers. Leurs variations viennent uniquement du mode de densification du laminé, toutes assurant une polymérisation par chauffage du moule.

PRESSURE BAG

Dans cette variante, la densification du laminé se fait par une pression pneumatique appliquée contre le laminé.

Au lieu de faire le vide entre la membrane et d'appliquer ainsi une pression de 10 à 14 psi, la pression est appliquée derrière la membrane.

Cette technique permet d'augmenter la pression sur le laminé et de ce fait d'obtenir une meilleure densification de celui-ci.

Dans cette technique, le moule est considéré comme une sorte d'autoclave. Il doit donc être bâti de manière à pouvoir résister à de hautes pressions.

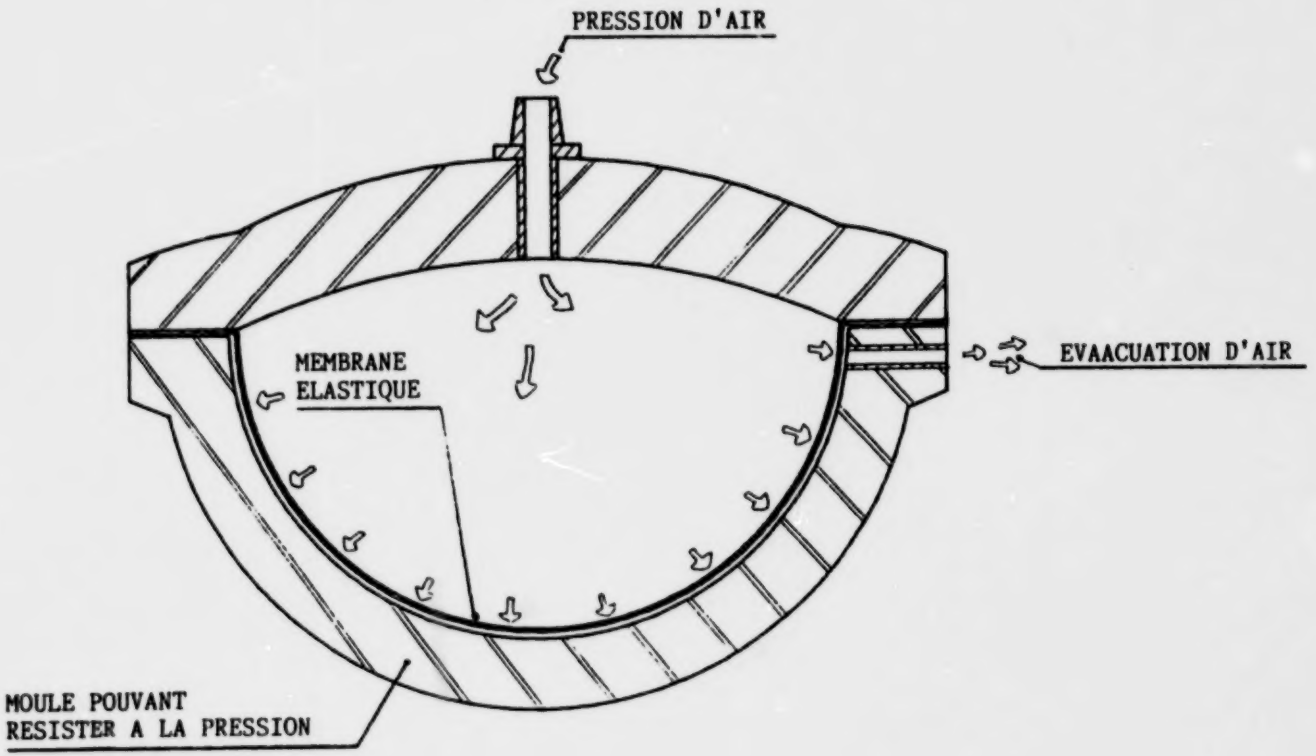
PRESSE CLAVE

Il y a deux catégories de presse clave, celle du type "pressure bag" et celle du type "pressure caule."

Dans la méthode du pressure bag, la presse est modifiée pour recevoir différents types de moules qui sont coinçés au creux de la cavité. La pression est appliquée sur la membrane et à l'intérieur de la cavité. Cette technique est adaptée aux plus petites pièces.

Le système "pressure caule" consiste à faire le vide entre la membrane et la laminé et de compacter celui-ci avec une presse. Cette technique est surtout employée pour la fabrication de plaques en laboratoire.

SCHEMA D'UN SYSTEME DE MOULAGE PAR "PRESSURE BAG"



HYDROCLAVE

Pour des raisons de sécurité les autoclaves dépassent rarement les 200 psi, sauf dans quelques appareils de laboratoire qui peuvent atteindre 500 psi.

Les laminages requérant des pressions pouvant atteindre 1000 psi sont faits dans des hydroclaves.

Ces systèmes dans lesquels la pression est transmise au travers un liquide sont très coûteux, rares et particulièrement difficiles à opérer.

VACUUM BAG AVEC CHAUFFAGE PAR LE LAMINE

Le chauffage de très grandes pièces est souvent difficile et coûteux. Dans certains cas, tel que pour la production de voiliers de grandes dimensions, il est pratiquement impossible de disposer de four permettant la cure et la post-cuisson du laminé.

Un groupe Français, de la firme Hexcel-Genin présente dans la revue "Composites No3 Mai/Juin 1986" une technique dans laquelle la chaleur est directement appliquée dans le laminé.

Elle consiste à utiliser un tissu de renfort contenant un minimum de fibres de carbone et de faire passer un faible courant électrique dans les fibres de carbone conductrices.

Après la mise sous vide du laminé, le courant électrique est appliqué au travers le réseau des fibres de carbone. L'échauffement de celles-ci provoque la polymérisation de la matrice.

Au dire des concepteurs, cette solution est économique et facile à contrôler, de plus elle a l'avantage d'appliquer la température exactement dans le laminé et ce avec un maximum d'efficacité. Ceci assure une polymérisation complète du système et une meilleure tenue mécanique.

EQUIPEMENTS POUR MOULAGE PAR AUTOCLAVE

MATERIEL POUR LE "BAGGING"

MEMBRANE FLEXIBLE (VACUUM BAG)

Cette membrane flexible recouvre toute la surface du laminé. Le vide sous cette membrane ou la pression dans l'autoclave,la force à compresser uniformément le laminé.

Le matériel utilisé pour la membrane doit être flexible, afin d'épouser les contours de la pièce sans se déchirer ou se perforer.

Selon le mode de polymérisation, la membrane doit résister à la température et être compatible avec le système de résines utilisé.

Enfin, pour certaines pièces produites en grande série, des sacs réutilisables seront employés, réduisant ainsi les coûts d'opération.

A titre de référence, voici quelques exemples de matériaux pour les membranes flexibles:

TYPE DE MEMBRANE	CARACTERISTIQUES
PVA	- Transparent - Usage à basse température - Economique
NYLON	- Transparent - Usage à haute température - Largement utilisé - Coût moyen
SILICONE	- Opaque - Souvent sous forme de sacs préformés et réutilisables - Plus coûteux

FEUTRE DE DRAINAGE (BLEEDER et BREATHER)

Lorsque la membrane flexible écrase le laminé, il pourrait y avoir des restrictions causées dans des zones où le film colle dans certains angles de la pièce. Ces restrictions causent des poches d'air sur le laminé.

Pour éviter ceci, la membrane exerce sa pression sur une sorte de tissu "coussiné" qui empêche tout coincement et permet une évacuation totale de l'air sous la membrane.

Ce sont des "feutres" poreux, pouvant être faits de tissus en fibres de verre, mais plus souvent en matériaux synthétiques. Ils permettent d'évacuer l'air et au besoin l'excès de résine.

Selon la configuration il est possible de n'utiliser qu'un "Breather" ou une combinaison "Breather/Bleeder". Par définition, le bleeder sert surtout à absorber l'excès de résine.

FILM DE DEMOULAGE (RELEASE FILM)

Ces films minces sont souvent faits à base de FEP (fluorocarbone), ils assurent le démoulage des pièces et la non-adhésion des membranes et des feutres de drainage.

Ces films peuvent être perforés, pour laisser passer l'air et l'excès de résine.

TISSU POREUX (RELEASE FABRIC)

Souvent fait de fibres de verre recouvertes d'un enduit démoulant, ces tissus servent à la fois de film démoulant et de "Bleeder".

TISSU D'ARRACHAGE (PEEL PLY)

Il s'agit de tissus en polyamide, fins et perméables à la résine. Placés immédiatement sur la surface du prepreg,les "Peel Ply" adhèrent légèrement au laminé et le protègent en vue des opérations secondaires. Certains types produisent une fine texture sur la surface de la pièce, ce qui facilite l'adhésion de la peinture.

MASTIC (SEALANT)

Ces rubans à base de Chromate de Zinc assurent l'étanchéité de la membrane sur le moule.

CALE D'ETANCHEITE (DAM)

Ces cales d'étanchéité sont en caoutchouc ou en liège. Elles peuvent être localisées autour du laminé et servir à contrôler la finition du contour de la pièce.

PLAQUE DE COMPRESSION (CAULE PLATE)

Ces éléments sont des plaques ou des profils servant à écraser localement le laminé. Ils servent entre autre à assurer une compression dans les zones angulaires difficiles à atteindre avec la membrane. Dans d'autres cas, ils peuvent assurer un compression contrôlée à la bordure d'un noyau.

DEMOULANT LIQUIDE (RELEASE AGENT)

Ces enduits sont appliqués sur le moule pour le protéger et assurer le démoulage de la pièce. Ils ne doivent pas contenir d'huile de Silicone ou de Fluoropolymère et ne pas laisser de dépôt sur le laminé, ceci afin d'assurer l'adhésion lors des opérations de finition ou de collage.

RUBAN ADHESIF (PRESSURE SENSITIVE TAPE ou FLASHBREAKER)

Ces rubans adhésifs, simple ou double face, retiennent les films en place durant les opérations de bagging. Ils ne doivent pas affecter la polymérisation, ne pas laisser de dépots tout en supportant la température.

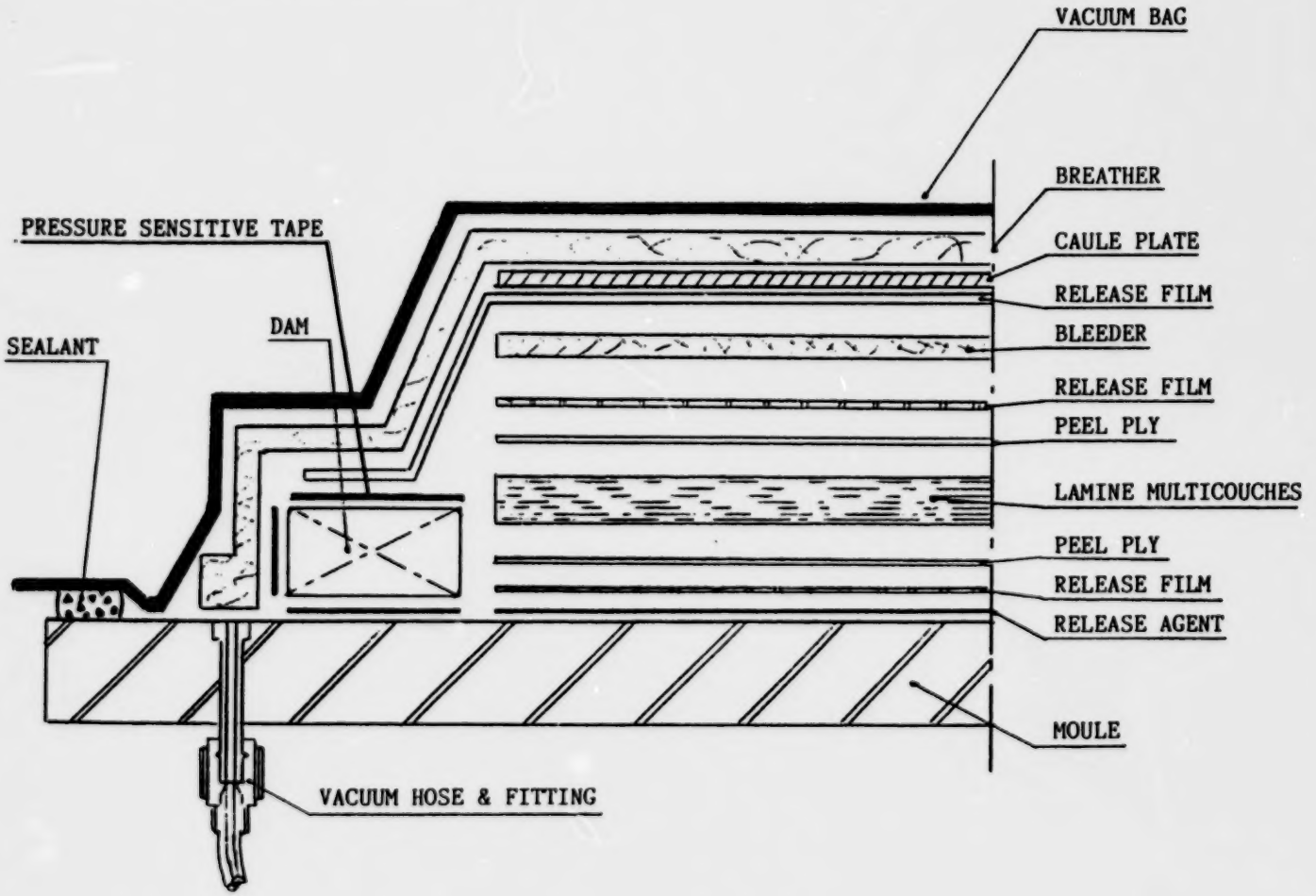
ACCESSOIRES DIVERS

Ils sont surtout constitués de connecteurs, de tuyaux et des raccords qui relient la membrane au système de vacuum.

Font aussi partie de cette liste, les divers types de thermocouples, insérés dans le laminé et servant à lire la température durant la polymérisation.

SCHEMA MONTRANT LES DIVERS MATERIAUX POUR LE "BAGGING"

LA SITUATION MONTREE SUR CE CROQUIS EST UN CAS EXTREME, JUSTIFIANT L'UTILISATION D'UN MAXIMUM DE MATERIAUX POUR LE "BAGGING".



APPAREILS DE CUISSON ET DE PRESSION

POMPE A VIDE

Qu'une étuve, un autoclave ou une presse-clave soit utilisé, il faut généralement assurer un vacuum sur le laminé. Ce qui implique un système autonome avec une pompe capable d'assurer au moins 600 mm de Hg, sa capacité volumétrique doit être en fonction de la grandeur des pièces moulées.

ETUVES

Pour certaines applications moins critiques, ou pour de très grandes pièces, il est parfois suffisant ou plus pratique de faire la cuisson en étuve et non en autoclave.

Les étuves sont alors de simples fours, généralement à chauffage électrique. Ces étuves de toutes dimensions doivent normalement être capables d'atteindre des températures de l'ordre de 350 à 450 F sur le laminé.

Les étuves doivent être munies de systèmes de contrôle de la cuisson, afin de produire des pièces de bonne qualité.

PRESSE-CLAVE

Ce genre d'équipement est surtout utilisé pour les petites pièces. On le retrouve souvent dans les laboratoires de recherche, car il est plus économique qu'un autoclave.

Ces presses sont équipées de plateaux chauffants, d'un système de vacuum autonome et des appareils pour le contrôle du cycle.

Une presse-clave de laboratoire typique, a un plateau de 18" x 18" et peut produire une pression sur le laminé de l'ordre de 350 psi.

Certaines presse-claves industrielles peuvent avoir des capacités de 1000 tonnes, elles sont munies de plateaux chauffants pouvant atteindre 1000 F et des vides de 29.5" Hg.

AUTOCLAVES

Les autoclaves sont des équipements coûteux, ceci vient de leur construction devant leur permettre de supporter des pressions pouvant atteindre 200 psi, à des températures de 350 à 450 F.

Ce sont des caissons métalliques, généralement sous forme de cylindres horizontaux, dont une extrémité est munie d'une porte.

En général, les autoclaves ont entre 12" et 96" de diamètre et leur longueur varie de 24" à 240". Il y a cependant sur le marché des appareils atteignant 25' de diamètre sur 60' de longueur.

Les autoclaves sont généralement équipés de systèmes de chauffage électrique.

La pression dans l'autoclave peut être faite par des compresseurs à air, mais il est fréquent d'utiliser des systèmes d'azote sous pression.

Pour être performant, un autoclave doit être muni d'instruments de contrôle assurant la gestion totale du cycle de cuisson, soit:

- Contrôle des thermocouples dans le laminé
- Contrôle de la montée en pression
- Contrôle de la température dans le caisson
- Contrôle de la durée du cycle
- Enregistrement des paramètres
- Programmation de la séquence

Pour la production de pièces rencontrant les normes aéronautiques, il est d'ailleurs essentiel de démontrer que toutes les étapes de cuisson furent suivies. Un enregistrement des paramètres durant la polymérisation devient alors essentiel.

En ce qui a trait au coût élevé d'un tel équipement, voici l'évaluation budgétaire d'une configuration type:

A titre indicatif, un autoclave de dimension moyenne, soit 48" de diamètre sur 72" de longueur, d'une capacité en pression de 450 psi à 650 F. peut coûter environ $350,000.00

CONTROLE DES MATERIAUX ET DES PRODUITS

CONTROLE DES MATERIAUX

Les prepregs représentent la majeure portion du moulage en autoclave. Ces matériaux étant produits selon des normes et des standards rigoureux, ils s'adaptent bien à ce procédé relativement coûteux.

Les contrôles sur la matière première portent surtout sur sa composition pour s'assurer du respect des normes et sur son état en regard du vieillissement durant l'entreposage ce qui affecte ses caractéristiques de moulage.

COMPOSITION DU PREPREG

La composition du laminé est souvent une formulation "propriétaire" non divulguée par le fabricant. Toutefois ce dernier fournit la fiche technique de son produit, de ses propriétés physiques et de son mode de polymérisation.

La plupart des tests de cette catégorie sont faits sur des plaquettes moulées en laboratoire et à partir desquelles on compare les propriétés physiques avec celles prescrites.

Le pourcentage et l'orientation du renfort et le taux de vide dans le laminé, sont d'autres tests pouvant être faits sur la matière.

VIEILLISSEMENT DE LA MATIERE EN ENTREPOSAGE

Les prepregs doivent être gardés dans des chambres froides afin d'éviter un avancement de la polymérisation ou une trop forte perte de matières volatils. Il est fréquent qu'un tel entreposage soit à -18 C. Les facteurs affectés par le vieillissement du matériel sont: "l'aspect collant" du prepreg, la facilité de fluage de la résine et le temps de gel du système.

"ASPECT COLLANT" (TACK CONTROLS)

Pour toutes les formulations de prepreg, à l'exception des silicones et de certains types de polyimides, les couches de tissus non-polymérisées doivent avoir un minimum de "collage" en surface.

Cette caractéristique est importante pour assurer une bonne adhésion inter-laminaire et de ce fait de bonnes propriétés mécaniques dans la pièce.

Cet "aspect collant" varie avec la durée d'entreposage, soit par avancement de la polymérisation ou par perte de volatils. Il faut donc vérifier cet état du prepreg avant de le mouler. Un matériau ne rencontrant pas la norme ne doit pas être utilisé.

D'autre part, un "aspect collant" trop prononcé rend le matériel pratiquement non-utilisable, dès que le film protecteur est enlevé. La manipulation peut causer une modification locale du ratio renfort/résine ou un déplacement de la fibre.

NIVEAU DE FLUAGE (FLOW CONTROL)

Il s'agit de vérifier la facilité qu'a la résine à se fondre dans les couches successives du laminé ou à s'échapper dans les tissus absorbants.

Ce paramètre est modifié par l'équilibre entre le taux de résine et "l'aspect collant" du prepreg. L'"aspect collant" est aussi fonction de la formulation du prepreg, certaines charges ou additifs pouvant le faire varier.

TEMPS DE GEL (GEL TIME)

Chaque prepreg est formulé pour garantir un certain temps de mise en forme avant sa polymérisation.

Cette période de temps de gel est racourcie par un temps d'entreposage prolongé. La vérification du temps de gel est donc un indicateur de l'évolution du matériel, due à son entreposage.

CONTROLES DES PRODUITS FINIS

Les matériaux composites ont une caractéristique unique: la matière et la mise en forme étant faites dans une même séquence. Ceci contraste avec les métaux qui sont achetés sous forme de demi produits et mis en forme par façonnage.

La qualité du composite dépend de plusieurs facteurs, tels que:

- Etat de la matière utilisée
- Procédure de polymérisation
- Qualité et propreté du travail

Bien entendu, la plupart des procédures d'inspection doivent être non-destructives, ou du moins capables d'être faites avec un minimum d'effet sur la pièce.

La liste suivante donne quelques-unes de ces procédures, avec pour chacune l'objet du test.

TESTS PAR ULTRASON

Ces méthodes permettent de vérifier la présence d'inclusion, la répartition verre/résine, la porosité, les fissures ou les délaminages. Son coût est modéré et la technique est largement répandue.

TESTS PAR RADIOGRAPHIE

Ces techniques requièrent un appareillage dispendieux, par contre elles sont très efficaces pour detecter des défauts tels que des inclusions, des défauts dans les noyaux sandwich ou dans le patron de fibre.

EMISSION ACOUSTIQUE

Il s'agit d'une procédure relativement nouvelle qui permet de vérifier la tenue structurale du laminé. Elle consiste à "écouter" les bruits des micro-fissures dans le laminé, lorsque celui-ci est sous contraintes.

ANALYSES THERMIQUES

La plupart de ces techniques sont au stade de mise au point. Elles concernent toutes l'absoption ou la réflection thermique du laminé et en particulier de la zone "suspecte".

Les techniques de cette catégorie sont:

- Thermal Wave Analysis
- Vibrothermography
- Heat Flux method (liquid crystals)
- Heat Flux method (IR camera)

CONTROLE DE LA DURETE DU LAMINE

Certains tests basés sur la dureté en surface du laminé polymérisé peuvent indiquer le niveau de cure. Ces tests sont relativement économiques, mais souvent ponctuels, de plus ils peuvent légèrement affecter la surface du laminé.

INSPECTION VISUELLE

Cette procédure, simple et économique, demeure un élément important des tests applicables aux laminés.

Certaines inclusions, de mauvaises procédures de bagging ou des défauts dans l'orientation des laminés peuvent ainsi être détectés.

IMPORTANCE DU CONTROLE DURANT LA PRODUCTION

Malgré toutes les méthodes techniques aussi perfectionnées qu'elles puissent être, il demeure que certains éléments ne peuvent être facilement détectables. L'oubli d'un film protecteur entre deux plis de laminé, est un de ceux-là.

Il importe donc de s'assurer qu'une procédure de moulage soit établie et respectée. La fabrication et la polymérisation de la pièce devant être suivie et annotée étape par étape.

Enfin, compte tenu du fait que les laminés pour des usages critiques ne peuvent pas être réparés, ceci impose un rigoureux respect de la procédure.

MOULES POUR MOULAGE PAR AUTOCLAVE

Les moules pour ce procédé de moulage doivent supporter la température du four, avoir un coefficient d'expansion thermique proche de celui des composites et dans certains cas, avoir une durée de vie de plusieurs centaines de cycles.

Les moules pour autoclave sont plus économiques que ceux pour le moulage par compression. Ceci parce qu'une seule face est reproduite et qu'ils ne subissent pas le même niveau de pression.

MOULES EN ACIER

Pour les formes relativement simples, les feuilles d'acier pliées et embossées peuvent être utilisées. Ces coquilles sont montées sur des structures métalliques et produisent des moules résistant à de nombreux cycles de moulage.

Le coefficient d'expansion thermique de l'acier se situe dans la même zone que celui des composites, ce qui ajoute à son intérêt.

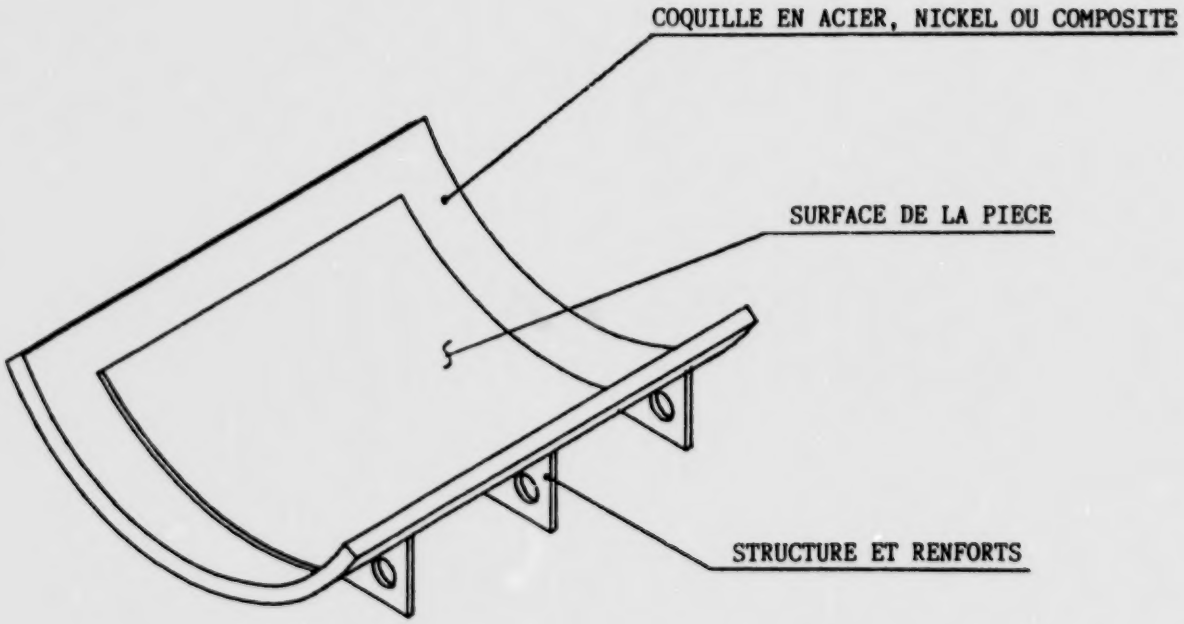
Par contre, l'acier à moins d'être usiné, est limité à des formes simples. Il s'adapte bien aux grandes surfaces planes ou légèrement courbées mais il est coûteux pour les pièces complexes.

MOULES EN ALUMINIUM

L'aluminium coulé est un matériau économique pour la production des moules. C'est aussi un médium transférant bien la chaleur.

Par contre, le coefficient d'expansion thermique de l'aluminium est de deux à trois fois supérieur à celui des composites. Ce type de moule devient alors désavantageux au niveau du respect des dimensions et il peut induire des distorsions et des contraintes dans la pièce finie.

SCHEMA D'UN MOULE POUR AUTOCLAVE



MOULES EN NICKEL

Des coquilles en nickel peuvent être facilement produites par électroformage. Cette technique est assez répandue et elle se montre avantageuse en comparaison de l'acier, pour la fabrication de moules complexes.

De plus, la dilatation thermique du nickel est proche de celle des composites et légèrement supérieure à l'acier.

MOULES EN MATERIAUX COMPOSITES

Deux techniques sont employées, soit la fabrication de moules en verre/époxy par moulage au contact et résine liquide, ou l'utilisation de prepregs en verre/époxy, moulés en autoclave ou par simples "vacuum bag"; la première technique étant plus ancienne que la première.

Malgré la relative faiblesse des moules en composites, ils sont souvent une très bonne solution, à la fois flexible et économique.

Certains ateliers ont utilisé avec succès, de tel moules pour des séries assez grandes et pour des pièces très critiques.

Les moules sont faits sur des modèles de bois, ce qui permet de reproduire économiquement des formes complexes. Dans le cas des moules en prepregs, ceux-ci recoivent un enduit de gelcoat qui en améliore la surface. Ce gelcoat demeure toutefois assez fragile et peut occasionner un taux d'entretien élevé de l'outillage.

En plus d'être économique, un des avantages reconnus aux moules composites est leur compatibilité évidente au niveau du coefficient d'expansion thermique.

Les moules en composites, qu'il s'agisse de prepregs ou de moulages époxys par contact, demeurent une solution très intéressante et qui est de plus en plus répandue pour des séries assez longues et pour des pièces critiques.

MATERIAUX POUR MOULAGE PAR AUTOCLAVE

LES PREPREGS

Bien que théoriquement il soit possible d'utiliser des résines liquides et de procéder par moulage de type "wet lay up", la grande majorité des résines et des renforts employés pour le moulage par autoclave sont sous forme de prepregs.

La thechnologie des prepregs remonte au début des années 50, elle consiste à enduire de résine le tissu de renfort et de le maintenir dans un état de demi-polymérisation jusqu'à sa mise en forme définitive.

Plusieurs résines thermodurcissables peuvent être mises sous forme de prepregs. Cependant, pour le moulage par autoclave et par vacuum bag molding, la majeure partie des prepregs sont à base d'époxy.

La méthode du prepreg permet de très bien contrôler les composantes du système, ce qui réduit l'imprécision et les risques d'erreurs reliés aux techniques de moulages avec résine liquide.

Les compagnies spécialisées dans la formulation des prepregs ont développé aux cours des ans, une large gamme de prepregs, adaptés à des applications spécifiques. Dans la grande majorité des cas, ces formulations sont propriétaires et seules les performances du produit polymérisé et le mode de cuisson sont donnés.

Les prepregs sont tout à fait adaptés aux moulages par autoclave de produits à hautes performances et ce pour les raisons suivantes:

- Facilité de les découper en patrons précis;
- Empillables selon la séquence de moulage;
- Permettent un bon contrôle de l'orientation;
- Propriétés déterminées et contrôlées;
- Polymérisation à chaud et sous pression.

RESINE EPOXY

CARACTERISTIQUES

Les résines d'époxy sont largement utilisées pour la fabrication des pièces dites à "hautes performances" et ce pour les raisons suivantes.

- Elles offrent un éventail de formulations permettant de rencontrer une large gamme de propriétés physiques et mécaniques.

- Elles ont une bonne tenue mécanique et une forte adhésion sur la plupart des renforts et des charges.

- Leur polymérisation se fait par polyaddition, ce qui ne produit aucun dégagement de sous-produits.

- Les époxys résistent à plusieurs agents corrosifs et ont une bonne tenue diélectrique.

- Ces résines ont un faible retrait au moulage.

- Plusieurs systèmes d'accélérateurs permettent de les rendre à un niveau de "pré-polymérisation" de type B-Stage, ce qui permet leur mise en prepregs.

Les époxys ont toutefois certains "inconvénients" dont il faut tenir compte.

Parmis les défaut des époxys, il faut noter leur coût, plus élevé que celui des polyesters, de même que leur mauvaise tenue aux rayons U.V. Enfin, notons que les systèmes époxys sont souvent plus nocifs que ceux au polyester et de ce fait, ils exigent une manipulation et une procédure de moulage plus "sécuritaire".

Dans la majorité des cas, la polymérisation des époxys doit se faire à haute température. Même avec les durcisseurs permettant une prise à température ambiante, une postcuisson est toujours avantageuse pour atteindre toutes les propriétés mécaniques et physiques.

Dans le cas des systèmes pour prepreg, seule la polymérisation à chaud est applicable.

TYPES DE RESINES

Il y a plusieurs types d'époxys, dont les principaux sont les suivants:

BIPHENOL A (DGEBA)

Les époxys à base de diglycidyl ether de biphenol A (DEGBA) sont les grades les plus largement utilisés parmis les résines époxys. Les dérivés de cette formulation offrent des produits de poids moléculaires variés ce qui conduit à un éventail de propriétés physiques et mécaniques.

ALIPHATIQUE et CYCLOALIPHATIQUE

Les époxys de base aliphatique peuvent dans certains cas servir de diliants ou de flexibilisants aux types DGEBA. Celles de types cycloaliphatiques offrent une plus grandes résistance aux U.V. et elles ont de meilleures propriétés diélectriques.

EPOXYS NOVALACS

Ces résines permettent d'atteindre une réticulation très dense. Ceci les avantage pour des applications à haute température ou pour une meilleure tenue chimique.

EPOXYS BORMINES

Ces grades dérivés des DGEBA, servent dans les pièces où la résistance au feu est nécessaire.

TYPES DE DURCISSEURS

Les durcisseurs influencent grandement les propriétés des pièces en époxy et plusieurs catégories de durcisseurs sont disponibles. Selon le type, ils peuvent être employés dans un dosage variant de 1% jusqu'à 100% du poids de la résine de base. Les principaux types sont:

AMINES ALIPHATIQUES

Permettent la polymérisation à la température ambiante.

AMINES AROMATIQUES

Offrent une tenue chimique et diélectrique.

ANYDRIDES D'ACIDES

Réagissant à chaud, ce durcisseur, souvent utilisé, permet d'atteindre une bonne tenue diélectrique.

ACIDES DE LEWIS

En plus d'offrir de bonnes propriétés mécaniques et diélectriques, les composés de ce type ne réagissent pas à moins de 120 C. ce qui confère une bonne stabilité au mélange, et au prepregs.

APPLICATIONS

Dans le moulage par autoclave, les prepregs époxys constituent la très large proportion des matériaux employés. Ces résines sont utilisée avec tous les types de renforts rencontrés dans les prepregs.

Les applications types sont des pièces tels que des sections de voilure, dérives d'avion, pales d'hélicoptère et des articles de sports, tels que des raquettes ou des bâtons de golf.

Parmi les applications nouvelles pour les prepregs, citons le cas des coques de voitures de métro (type monorail). Ce concept met à profit la légèreté, la résistance mécanique et la tenue au feu des laminés sandwichs verre/époxy/nid d'abeilles.

RESINES POLYIMIDES

Les polyimides sont des matériaux ayant des propriétés mécaniques très élevées et les maintenant à de hautes températures pour de longues périodes. Il y a deux types de polyimides, ceux de polycondensation et ceux de polyaddition.

POLYIMIDE PAR POLYCONDENSATION

Mis au point par DuPont de Nemours durant les années 60, ces matériaux alors très prometteurs furent utilisés pour des formulations de compounds pour la compression de prepregs pour les pièces en composites. Dans cette dernière catégorie on les retrouvent sous les noms de "SKYBOND" fait par MONSENTO et de "PYRALIN" par DUPONT.

Ces matériaux présentent toutefois un sérieux problème au niveau du pourcentage de vide laissé après polymérisation. Jusqu'à 10% de vide peut être présent dans le laminé, ce qui en limite beaucoup les applications.

Aujourd'hui, les polyamides sont surtout vendus en demi-produits ou en petites pièces. Ce sont les fournisseurs de la matière qui en font eux-mêmes le moulage. La fabrication est faite par des procédures propriétaires, limitées aux fabricants de la matière.

POLYAMIDE PAR POLYADDITION

Ces matériaux mis au point vers le début des années 70, ne présentent pas les problèmes de vide et de porosités des autres polyamides. Ils sont ceux généralement employés pour le moulage de prepregs par autoclave.

Il y a trois familles, qui peuvent à leur tour se partager en une foule de variantes, formulées pour répondre à des besoins spécifiques. Ces grandes familles sont:

- BISMALEIMIDE
- PMR-15 et PMR-II
- LARC-160

CARACTERISTIQUES DES POLYIMIDES PAR POLYADDITION

Les polyimides ont des propriétés particulièrement remarquables, tant par leur tenue en température que par leurs résistances mécaniques.

A titre d'exemple, des laminés unidirectionnels faits de PMR-15 et de fibres de carbone ont les propriétés suivantes (dans l'axe de la fibre)

- Résistance en tension 180,000 psi
- Module en tension 21.7×10^6 psi
- Résistance en flexion 206,000 psi
- Module en flexion 17.6×10^6 psi

Du point de vue de la résistance thermique, les propriétés données précédemments ne sont que faiblement amoindries à des températures de 350 F.

Les polyimides peuvent dans certains cas être utilisés à plus de 600 F.

Ces laminés ont un très faible fluage et une grande stabilité dimensionnelle.

Du côté des aspects négatifs, les principaux obstacles à l'utilisation de ces matériaux sont d'une part leur coût élevé, ainsi que leur relative difficulté de mise en oeuvre.

Enfin, certains types de polyamides subissent un vieillissement accéléré en présence de vapeur d'eau.

APPLICATIONS

L'aéronautique et l'aérospatiale sont les champs privilégiés pour ce type de composites.

On les retrouvent dans des applications telles que des pelles d'inverseurs sur les moteurs à réaction, des pièces d'habillage d'avion, dans la fabrication de composantes sur les navettes spatiales américaines.

Enfin, le moulage de pâles pour souffleries est un autre domaine où s'utilise de tels composites.

RESINES PHENOLIQUES

Les phénoliques jouent un rôle moins important dans le domaine des composites moulés par autoclave. Toutefois, ces matériaux ont des propriétés spécifiques les rendant uniques pour certaines applications.

Ces résines se polymérisent par polycondensation du phénol et du formol. En milieu alcalin elle donne des phénoliques de type Pf1 et la réaction dégage de l'eau.

Les prepregs phénoliques sont surtout utilisés pour la fabrication des laminés devant rencontrer des normes sévères aux niveaux feu/fumée/toxicité.

Bien que les phénoliques aient une bonne tenue en température, dans certains cas jusqu'à 500 F., ils sont déclassés à ce chapitre, par les polyimides.

Règle générale, les phénoliques sont moins coûteux que les autres matériaux pour fabrication par autoclave. Cependant leurs propriétés mécaniques ne les favorisent pas vis-à-vis les époxys.

RESINES POLYESTERS

Bien que les polyesters soient économiques et qu'il aient une certaine fiabilité structurale, ils ne se prêtent pas à la fabrication de prepregs de type B-Stage, comme le font les époxys. Aussi, c'est surtout sous formes de résines liquides qu'ils seront utilisés.

Pour cette raison, le moulage sous vide se limite généralement au vacuum bag, sans polymérisation en autoclave. Un étuvage permet cependant d'accroitre sensiblement le degré de polymérisation du laminé.

Pour le moulage de coques de voiliers en composition sandwich, le vacuum bag du composite à base de polyester permet d'obtenir une meilleure adhésion inter-laminaire.

FIBRES ET TISSUS DE RENFORT

Bien que la tenue chimique, la mise en forme et la résistance à la chaleur du composite soient en fonction du type de matrice employé, sa résistance structurale est largement attribuable aux renforts qui lui sont incorporés.

Parmi les principaux types de renforts, il y a:

- Verre
- Aramide
- Carbone et Graphite
- Boron

VERRE

La fibre de verre est commercialisée depuis le début des années 30. Cette forme de renfort, à la fois économique et performante fut dès le début des plastiques renforcés, utilisée comme fibre de renfort.

Les filaments de verre sont étirés à partir d'un bassin de verre fondu à quelque 2300 F. La vitesse d'enroulement et d'étirement des filaments régit la taille du filament.

En regroupant plusieurs filaments de verre, on produit des "rovings" torsadés ou plats. Ces "rovings" peuvent être utilisés tels quels ou subir une deuxième mise en forme.

Celle-ci consiste à hacher les "rovings" en fibres courtes et les réunir en tapis, appelés "mat" ou à les tisser pour obtenir des toiles et tissus croisés. Ces tissus croisés peuvent avoir diverses calibrations ou patrons de tissage.

A la sortie de la filière, les fils de verre reçoivent un ensimage ayant pour but de leur permettre d'avoir un liaison chimique et une bonne adhésion avec les matrices. Cet agent d'ensimage facilite aussi le tissage de la fibre.

Les agents d'ensimage doivent être compatibles avec le type de résine qui servira de matrice, de manière à assurer une bonne liaison chimique entre le renfort et la résine.

En plus de se présenter sous diverses formes, en tissus mats, tissus croisés ou toiles, la fibre de verre peut varier selon sa composition chimique. On retrouve ainsi plusieurs grades, dont les principaux sont les types C, E, S

TYPE C - Meilleure tenue chimique, ce verre sert généralement pour la couche de surface des équipements exposés à la corrosion

TYPE E - Ayant une bonne résistance électrique, ce verre est le plus répandu et le plus économique, il sert dans une large part du moulage avec les polyesters et se retrouve dans certains prepregs

TYPE S - Avec une plus grande résistance structurale, ce verre et ses dérivés servent souvent dans la fabrication des prepregs.

La fibre de verre est le type de renfort le plus largement utilisé par l'industrie des composites. Elle est compatible avec la majorité des résines, auxquels elle confère une remarquable tenue mécanique.

De plus la fibre de verre est généralement la plus économique des fibres de renforts à hautes performance.

Dans le moulage des prepregs à base d'époxy, on retrouve la fibre de verre dans des applications telles que des composantes aéronautiques ou militaires. Il faut toutefois préciser qu'il s'agit plus souvent de verre type S, bien que le type E puisse être utilisé dans des pièces moins structurales.

ARAMIDES

Surtout connue sous le terme KEVLAR et mise au point par la firme DUPONT, la fibre aramide est plus coûteuse que le verre.

Le KEVLAR se retrouve sous les types 29 et 49, ce dernier étant à plus haut module, est celui généralement employé pour la fabrication des composites.

La principale caractéristique du KEVLAR est sa forte résistance en traction en rapport à un poids relativement faible. De plus c'est une fibre auto extinguible ayant un très haut module d'élasticité.

En ce qui a trait aux aspects négatifs des aramides, il faut noter une relative faiblesse en compression de même qu'une mauvaise résistance aux U.V. De plus, la découpe et l'usinage des pièces en KEVLAR sont des opérations particulièrement difficiles.

Les systèmes par découpe à jet d'eau sous pression sont à toute fin utile les seuls vraiement performants avec ce type de renfort.

Pour le moulage des composites haut de gamme, les aramides sont souvent utilisés avec les époxys. Leur avantageux ratio poids/résistance les favorise pour des applications dans le domaine de l'aéronautique.

Des planchers, des portes et d'autres composantes d'habillages pour les avions et les hélicoptères, sont des applications types de ces laminés.

Le KEVLAR a également une très bonne résisance anti-ballistique. Il est devenu un matériau largement utilisé pour la fabrication d'armures légères ou de casques militaires.

CARBONES ET GRAPHITES

La maitrise de ces fibres de renfort remonte au milieu des années 60. Elles offrent un haut module et contrairement aux aramides elles n'ont pas une relative faiblesse en compression.

On confond souvent fibres de carbone et fibres de graphite. En fait il s'agit d'une même base de matériaux, mais ayant subi un niveau de préparation différent.

Les fibres de carbone et de graphite sont préparés par pyrolyse en atmosphère neutre, d'un composé organique tel que l'acrylonitrile (PAN).

Cette décomposition thermique faite sur des fibres alignées et non torsadées, laisse une structure carbonique orientée dans l'axe de la fibre, cette orientation n'est toutefois pas parfaite. Une pyrolyse subséquente de cette structure, aux environs de 3000 F. permet d'améliorer l'orientation moléculaire, ce qui conduit à la formation de fibres de carbone.

La différence entre la fibre de carbone et la fibre graphite vient du niveau de pyrolyse atteint, ce qui influence la rigidité de la fibre.

Pour le graphite, on poursuit la pyrolyse jusqu'à près de 5500 F., ce qui laisse une fibre de carbone (graphite) à haut module.

Compte tenu du coût élevé des fibres de carbones, leurs principales applications sont dans les domaines militaire et de l'aéronautique. On met à profit leur haut module et leur forte résistance en tension et en compression.

Parmi les aspects négatifs de ces matériaux, il faut noter la faible résistance à l'abrasion de la fibre seule et son faible allongement, qui en limite l'utilisation dans les petits rayons.

Les graphites sont associés aux époxys ou aux polyamides pour donner des prepregs haute performance.

FIBRES DE BORE

Ces filaments très coûteux sont produits par vaporisations de bore sur un filament de tungstène.

Ce sont des fibres ayant une très bonne tenue en compression et dont la densité est légèrement supérieure à la fibre de verre. elles servent surtout dans les domaines de l'aéronautique et de l'aérospatiale.

Leur coût très élevé, dû à leur lente fabrication ne permet pas une large diffusion de ce type de renfort.

COMPARAISON ENTRE DIVERS TYPES DE FIBRES DE RENFORT

PROPRIETES	VERRE "S"	KELVLAR 49	GRAPHITE	BORE
POIDS SPECIFIQUE	2.48	1.45	1.80	2.61
RESISTANCE TENSION $X10^3$ psi	665	400	440	520
MOULES TENSION $X10^6$ psi	12	19	35	58

COMPARAISON ENTRE LAMINES PREPREG AVEC TISSUS CROISES

	VERRE "S" EPOXY	GRAPHITE EPOXY	KEVLAR "49" EPOXY
RESISTANCE TENSION ,000 psi	63	80	60
MODULE TENSION ,000,000 psi	3.5	10	4.4
RESISTANCE COMPRESSION ,000 psi	68	85	28

FOURNISSEURS DE PREPREGS

CIBA-GEICY (CDN) 416 821-4420

FIBERITE (USA) 602 730-2251

MATERIAUX DE CENTRE

Le moulage des prepregs par autoclave est une technique qui s'adapte très bien à la production de composites sandwichs.

Cette forme de fabrication, mettant à profit les propriétés mécaniques des matériaux de face ainsi que la basse densité d'un noyau alvéolaire permet de produire des pièces légères et très résistantes.

Les principaux types de matériaux de centres sont les suivants:

- Bois de balsa
- Mousse PVC
- Nid d'abeilles

BOIS DE BALSA

Ce matériau a une structure cellulaire semblable à de microscopiques alvéoles. Le bois de balsa, dont la densité varie de 4 à 12 lbs au pied cube est orienté de manière à ce que les fils du bois soient perpendiculaires aux faces du sandwich. Cette configuration améliore l'adhésion.

Le bois de balsa est surtout employé par les techniques de moulage au contact ou par vacuum bag.

MOUSSE THERMOPLASTIQUE

Il s'agit surtout de mousses PVC qui sont utilisées dans des densités variant de 1.2 à 15 lbs au pied cube.

Comme le balsa, ces matériaux sont surtout utilisés avec des systèmes à résine liquide et surtout compatibles avec le procédé vacuum bag.

NID D'ABEILLES

L'utilisation de prepregs faits de résine B-stage permet de coller les peaux non-polymérisées sur des noyaux faits d'alvéoles creuses.

Cette configuration permet un maximum de rigidité pour un minimum de poids.

Les noyaux en nid d'abeilles peuvent être faits à partir de carton, d'aramide ou d'aluminium.

Les composites sandwichs faits en autoclave à partir de tissus prepregs utilisent surtout des âmes en nid d'abeilles.

La configuration et la densité des alvéoles déterminent la résistance mécanique et la facilité de mise en forme de la pièce.

REGLES DE DESIGN

FORMES ET STANDARDS DE MOULAGE

CRITERES DE DESIGN

Le moulage par autoclave implique une procédure de laminage des divers tissus de renfort, qui sont généralement sous forme de prepregs. Cette séquence de laminage, doit respecter des règles précises pour rendre un produit qui rencontre les performances physiques recherchées.

Les étapes de laminage des diverses couches de tissus peuvent être faites manuellement ou être robotisées. Cette dernière technique assure une plus grande précision de la séquence de déposition et d'orientation des tissus, sans négliger la réduction des risques de contamination des tissus, durant leur manutention.

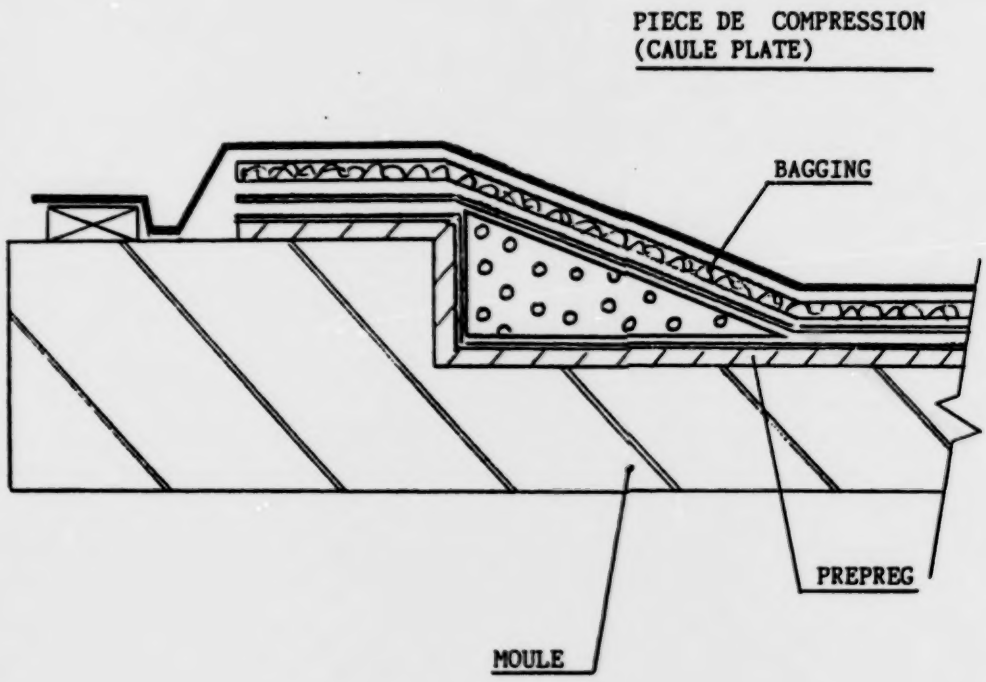
CONTROLE DES SURFACES MOULEES

En général les moules ne contrôlent qu'une seule face du laminé, la face opposée au moule étant contrôlée par le film démoulant.

Le choix du film, ou l'utilisation d'un "Peel Ply", laissant, une fois arrachée, une texture sur le laminé, permet cependant de modifier la rugosité de surface du laminé. Cette technique sert surtout pour réduire les opérationsde préparationde surface dans le cas d'opérations secondaires, telles que peintures ou collages.

Il est également possible de contrôler partiellement ou totalement la surface opposée au moule, en utilisant un moule à compression ou une cale à compression (Caule Plate). Une cale à compression permet par exemple d'assurer un bon écrasement du laminé dans certaines zones plus difficiles à compresser.

UTILISATION D'UNE CALE A COMPRESSION



TAILLE ET FORME DES PIECES MOULEES PAR AUTOCLAVE

Le moulage par autoclave permet le moulage de pièces aussi grandes que des pales d'hélicoptère ou des composantes d'avion. La limitation vient du coût élevé des grands autoclaves, plutôt que de la technologie elle-même.

En ce qui a trait aux formes des pièces, bien qu'il soit toujours plus facile d'utiliser des angles de démoulage d'au moins 1 degré, il est assez facile d'employer des moules à sections amovibles.

Il est même possible, compte tenu du fait que le prepreg est appliqué à "sec", d'utiliser des gaines gonflantes pour mouler des pièces creuses, tel qu'illustré dans le croquis de la page suivante.

RAYONS DE RACCORD ET COURBURES

Il est préférable d'éviter les petits rayons de raccord, les fibres ne pouvant pas plier facilement pour les épouser, il peut en résulter des défauts de laminage.

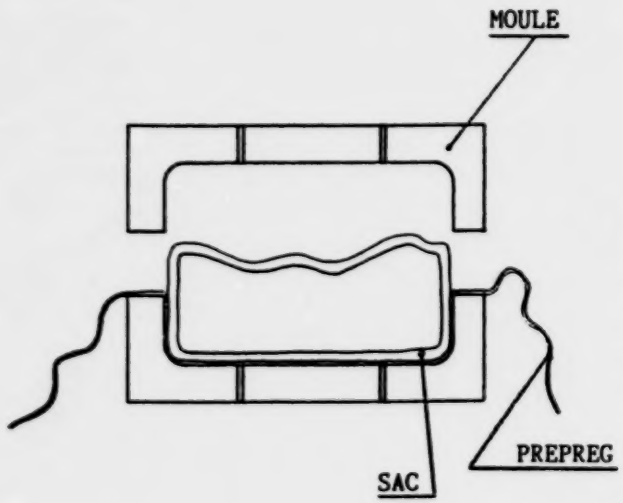
De plus, ces sections favorisent les concentrations d'efforts, qui réduisent la tenue structurale des laminés.

DECOUPE DES PIECES

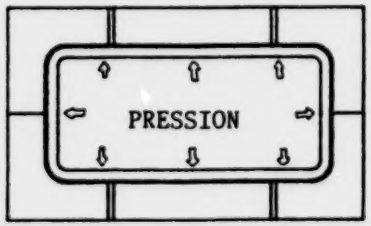
Règle générale, les pièces doivent subir une finition telle que la découpe et le perçage. Malgré la précision des découpes robotisées des tissus prepregs, cette méthode ne permet pas de respecter toutes les configurations des ouvertures. Aussi les découpes sont faites sur les pièces moulées.

Pour maintenir une haute résistance mécanique, il faut éviter lors des découpes ou des perçages, de couper les fibres dans des zones à contraintes élevées. Une des méthodes pour réduire ce risque, consiste à mouler les perforations en déplaçant les fibres, autour de celles-ci.

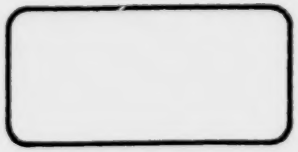
PRINCIPE DE MOULAGE D'UNE PIECE CREUSE



DEPOSITION DANS
LE MOULE



PRESSION, MOULAGE
ET POLYMERISATION



PIECE MOULEE

INSERTS ET JOINTAGES DES PIECES

Les pièces moulées doivent être assemblées à d'autres composantes, que ce soit par collage ou par montage mécanique; les techniques doivent tenir compte de la spécificité des composites.

INSERTS

Les inserts sont des écrous ou des bagues filetées, permettant l'assemblage mécanique de la pièce ou le montage d'accessoires.

Comme le moulage par vacuum bag et par autoclave, ne rend pas aisée la pose des inserts au moulage, ceux-ci sont posés en opérations secondaires. Il y a deux méthodes de pose des inserts: mécanique ou par adhésion.

INSERTS MECANIQUES

Les inserts montés mécaniquement sont tout simplement fixés au travers de la pièce. Il s'agit de rivets ou d'écrous à pression. Cette méthode relativement facile d'utilisation, implique cependant le perçage de la pièce, ce qui n'est pas toujours souhaitable, à cause des concentrations d'efforts.

INSERTS COLLES

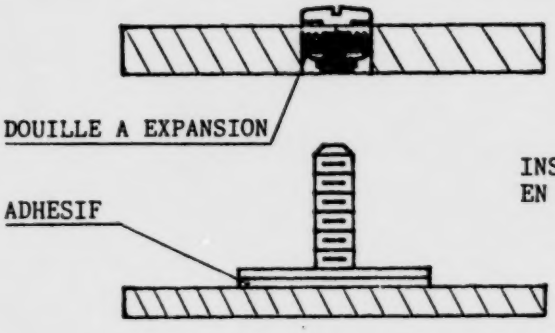
Ils sont de deux types: en surface ou en profondeur.

Les premiers, sont montés sur des plaques d'adhésion, compatibles avec le substrat. Ils peuvent être auto-adhésifs ou être collés par une résine époxy. Ces inserts permettent une grande flexibilité de montage et ils n'endommagent pas la structure du laminé.

Les inserts posés en profondeur du laminé, sont surtout utilisés dans les pièces "sandwichs". La première peau du laminé et une portion du noyau sont perforés, l'insert y est déposé et enrobé dans une pâte époxy qui le coince en place.

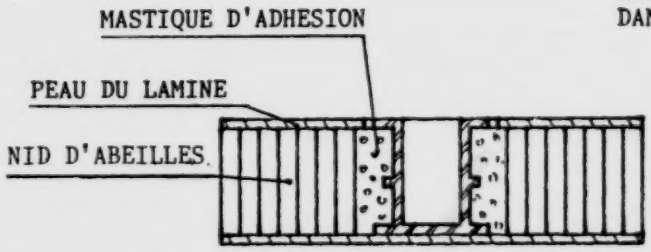
PRINCIPE DE MONTAGE DES INSERTS

INSERT FIXE MECANIQUEMENT



INSERT FIXE PAR COLLAGE
EN SURFACE DU LAMINE

INSERT FIXE PAR ADHESION
DANS LE CORPS DU LAMINE



Les inserts posés en profondeur peuvent donner une meilleure résistance, car ils sont mieux intégrés au laminé.

Une variante de cette technique, consiste à prévoir la localisation de l'insert dès le moulage et à emplir localement le noyau alvéolaire d'une pâte époxy (Core putting). Au montage de l'insert, un trou est perforé dans ce mastic et l'insert y est collé. Pour les applications moins structurales, des inserts auto-taraudeurs pourraient être vissés dans le mastic.

JOINTAGE DES PIECES

Les techniques d'assemblage s'apparentent à celles décrites pour la pose d'insert, soit par l'assemblage mécanique (rivetage) ou par adhésif.

L'assemblage mécanique, bien que plus "positif" peut induire des concentrations d'efforts ou causer des faiblesses locales dans la structure du composite. Cependant, il est généralement plus facile à réaliser.

Le collage, par contre, offre un plan de jointage beaucoup plus grand et il réduit les efforts locaux. De plus, l'adhésion permet d'éviter la présence d'éléments non-désirables sur certaines surfaces, tels que les têtes de rivets.

La procédure de collage peut être faite en autoclave ou en étuve avec des gabarits de compression. Pour ces méthodes, des époxys en film permettent un bon contrôle de la quantité d'adhésif, ce qui conduit à un résultat optimum. Dans certains cas, ces films, de type "supported" sont enrobésautour d'un tissu. Cette configuration empêche un trop fort écrasement qui chasserait la résine du plan de collage et réduirait l'adhésion.

Il faut cepedant tenir compte que la majorité des problèmes de manque d'adhésion sont dûs à une mauvaise préparation des surfaces avant le collage, ou à une contamination de celles-ci.

APPLICATIONS SANDWICHS

La fabrication de pièces à parois sandwichs est très bien adaptée aux matériaux composites. Elle utilise en effet des peaux minces et légères qui sont collées de chaque côté d'un noyau léger.

Comme les prepregs sont moulés en autoclave à partir de couches laminées les unes sur les autres, il est simple d'intercaler entre ces couches, un noyau alvéolaire qui donne une paroi sandwich.

Mis à part les éléments tels que la qualité de l'adhésion des peaux et la sélection des matériaux, les principales contraintes du moulage des composites sandwichs sont les suivantes:

PERIMETRE DES PIECES

Pour éviter des délaminages, il est recommandé de fermer le périmètre des pièces sandwichs. Quelques méthodes sont montrées dans le croquis ci-joint. Le principe consiste à augmenter la surface de collage réunissant les peaux l'une sur l'autre ou en utilisant une pièce intermédiaire qui remplace localement le noyau.

FORMES ET RAYONS DE COURBURE

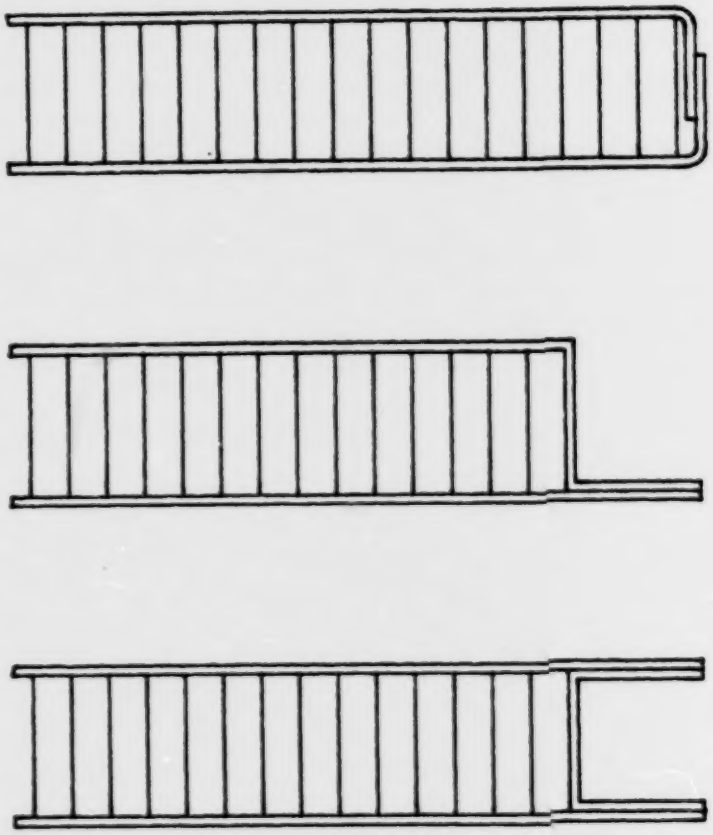
Selon les types de noyaux utilisés, il peut être difficile de suivre des rayons de courbure très serrés.

Dans le cas des noyaux en nid d'abeilles, il est possible d'utiliser localement un type de noyau appelé "expanded core". Ces cellules rectangulaires permettent une plus grande flexibilité dans un axe. Ces matériaux sont cependant plus coûteux et leur usage est limité aux seuls rayons de raccord.

Pour les pièces complexes, les noyaux sont préformés avant d'être insérés dans le laminé.

SANDWICHS

DETAIL DE FINITION DES BORDURES



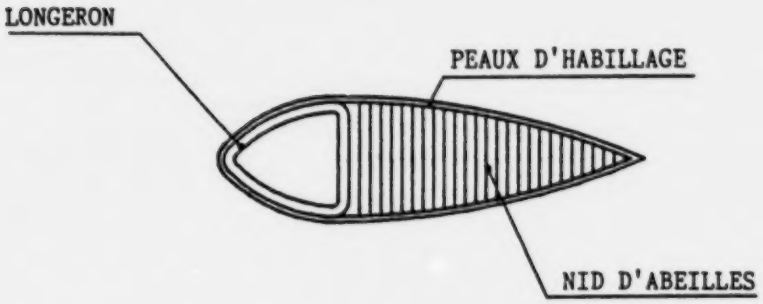
APPLICATIONS TYPES

L'aéronautique et l'aérospatiale demeurent les deux principaux secteurs où l'on utilise les composites moulés par autoclave.

AERONAUTIQUE

PALES D'HELICOPTERE

Les pales d'hélicoptère, moulées en composites sont plus légères et plus performantes que celles en acier. Leur construction comprend une membrure structurale, qui donne la régidité et assure la fixation au rotor. Vient ensuite le laminage de l'aile, faite d'un sandwich en nid d'abeilles (nomex) et un prepreg (verre epoxy).



SECTION DE PALE D'HELICOPTERE

AILERONS, STABILISATEURS et EMPENNAGE

Les composites sandwichs, à base de renfort "carbone", "aramide" ou "verre" sont de plus en plus largement utilisés pour ces composantes. Les avions Boeing 767 et Airbus A-310 sont des exemples d'application de ce genre.

COMPOSANTES D'AVIONS DE CHASSE

Le secteur de l'aéronautique militaire fait un usage important de pièces structurales moulées en composites.

AEROSPATIALE

Les applications dans ce secteur sont très nombreuses. C'est un domaine où le coût élevé de certains matériaux ne fait pas obstacle, le critère étant essentiellement la performance.

PORTES CARGOS DES NAVETTES SPATIALES

Ces composantes sont moulées en carbone/époxy par le procédé en autoclave. Plusieurs autres composantes des navettes spatiales, telles que des pièces d'habillage sont elles aussi moulées en composites, par autoclave.

TRANSPORT PUBLIQUE (TERRESTRE)

Peu à peu les avantages des matériaux composites "haut de gamme" sont utilisés dans d'autres secteurs que ceux de l'aéronautique. Un exemple particulièrement intéressant vient de la fabrication de voiture de Monorail, par la firme canadienne, Bombardier Inc.

Les coques des voitures, incluant murs, planchers et plafonds, sont faites en parois sandwichs, à partir de verre/époxy et de Nomex.

Par la même technique on construira aussi la section frontale monocoque de ces voitures de monorails.

C'est la performance, la sécurité et la légèreté qui ont motivé le constructeur à opter pour ces matériaux. En plus des considérations mécaniques, les matériaux doivent rencontrer les normes de feu, de fumée et de toxicité qui leur sont propres.

PRODUITS RECREATIFS

Les équipements de compétition de haut calibre ont recours aux composites moulés par autoclave pour la fabrication d'équipement sportif.

Les voiliers de compétition, les carrosseries de voitures de course et certains avions "home built" ont recours à cette technologie.

ANALYSE ET SIMULATION DU MOULAGE PAR AUTOCLAVE

Comme le moulage par autoclave touche surtout aux domaines où la haute performance est le critère, les composites de ce type ont fait et font l'objet de nombreuses recherches visant à en maîtriser le comportement.

Il y a deux niveaux de facteurs, intimement reliés entre eux et qui régissent le contrôle de cette technique de moulage.

Les premiers dépendent de la séquence de laminage et les seconds sont en fonction du mode de polymérisation.

EFFETS DE LA SEQUENCE DE LAMINAGE

Parmi les éléments agissant à ce niveau, il faut surtout citer les suivants:

CHOIX DU SYSTEME MATRICE/RENFORT

Tel qu'il fut démontré dans la section sur les matériaux, il y a une large gamme de matrices et de renforts, permettant de rencontrer un éventail de requis et de spécifications.

La maîtrise et la prédiction des propriétés du laminé débutent donc avec la connaissance et la caractérisation de ces divers systèmes.A cet effet, les fournisseurs de matières premières ont déjà établi des standards et des fiches de référence pouvant servir de contrôle.

SEQUENCE DE LAMINAGE

Il s'agit du choix des calibres de renfort, des quantités utlisées et des épaisseurs moulées. Un élément important de la séquence de laminage, concerne l'orientation des fils de renfort. Les prepregs sont des matériaux anisotropiques et les propriétés mécaniques sont largement dépendantes de l'orientation des fibres. Cet élément doit donc faire partie de l'analyse en vue de prédire le comportement du laminé et être traduit dans un devis de moulage qui sera rigoureusement suivi.

PRE-COMPRESSION DU LAMINE

Pour que le laminé atteigne une densité maximum lors de sa polymérisation, il est souvent avantageux de le compacter. Cette opération de "debulking" s'applique surtout aux laminés de forte épaisseur.

Elle peut être faite par vacuum bag ou par compression et permet une densification de l'empillage des tissus prepregs.

EFFETS DE LA POLYMERISATION

Il s'agit de la maitrise des paramètres reliés à la polymérisation et à l'écoulement de la résine durant cette polymérisation.

La cuisson du prepreg se fait avec chaleur et pression. Ces éléments permettent de réaliser la réticulation de la matrice et son enserrement autour des fibres de renfort en un solide contenant un minimum de vide.

Il importe d'utiliser un prepreg ne contenant que le minimum de résine requis pour assurer un bon collage interlaminaire et obtenir un fort ratio fibre/matrice.

Lors de la mise en autoclave et avec l'élévation de la température, la résine a une forte réduction de sa densité. Elle se comporte alors comme un liquide qui doit pénétrer les couches adjacentes du laminé, forçant l'évacuation de l'air et permettant une meilleure compaction.

Le mouvement de la résine peut tenir compte de deux modèles, soit un mouvement ascendant, intercouche, chaque rang de prepregs étant vu comme une sorte de filtre dans lequel pénètre la résine de la couche adjacente; ou un mouvement latéral intercouche, s'apparentant alors à un écoulement sous l'effet d'écrasement (squeezing).

Des recherches sont en cours pour modéliser l'écoulement de la résine durant la phase de polymérisation. Les revues "POLYMER COMPOSITES, février 87 vol 8, no 1 et avril 87 vol 8, no.2" présentent une telle approche de modélisation, faite par le groupe Dave, Kardos et Dudukovic. Ces chercheurs élaborent un modèle d'écoulement tri-dimensionnel, permettant de prédire l'évolution de la pression dans le laminé, la vélocité du mouvement de la résine et la courbe du ratio fibre/résine qui résulte de l'écoulement.

ANALYSE ET COMPREHENSION DES COMPOSITES

Malgré la progression des recherches sur les phénomènes reliés à l'écoulement de la résine dans le prépreg, la majeure partie des analyses faites sur les composites porte surtout sur leur aspect structural, après polymérisation.

Ces analyses sur le produit fini sont déjà fort complexes, du fait de la nature même des composites, de leur relative nouveauté et du large éventail de matériaux et de renforts pouvant être employés.

Enfin, les aspects formes et séquences de laminage viennent ajouter au problème de l'analyse de ce type de structure, en permettant de jouer avec le calibre, l'empillage et surtout l'orientation de la fibre de renfort.

POTENTIEL DU MOULAGE PAR AUTOCLAVE

Le moulage en autoclave des prepregs thermodurcissables, demeure une technologie réservée au domaine des composites de haute performance.

Les coûts reliés à la relative lenteur de la technique et aux matériaux utilisés, sont des éléments qui limitent les applications aux marchés dans lesquels la performance doit l'emporter sur le coût.

Les secteurs de l'aérospatiale, de l'aéronautique, les applications militaires et certains équipements sportifs haut de gamme, demeureront les secteurs privilégiés de ces matériaux composites.

Malgré l'étroitesse apparente de ces secteurs, les composites qui occupent ce marché ont encore beaucoup de place et de potentiel de développement.

Cependant, compte tenu des risques reliés aux applications aussi lourdes en conséquences que celles rencontrées dans les secteurs mentionnés plus haut, la progression des nouvelles applications doit se faire lentement et prudemment.

Parler du potentiel du procédé de moulage par autoclave, c'est surtout parler du potentiel des prepregs et le moulage par autoclave est jusqu'à présent le meilleur médium de transformation de ces produits.

Le potentiel ne semble pas uniquement reposer sur l'amélioration des équipements de moulage ou sur la réduction des coûts, mais plutôt sur la maîtrise plus grande et la prédiction plus juste des performances obtenues sur les pièces moulées.

Les facteurs qui favoriseront le développement des applications de ces composites sont:

COMPREHENSION DU PHENOMENE D'ECOULEMENT DE LA RESINE

La juste compréhension des phénomènes intervenant dans le laminé au moment de sa cuisson et leur influence sur la performance du laminé sont des éléments qui aideront le concepteur dans la maitrise du procédé et de ce fait dans l'élargissement du champ d'application.

HABILETE A MAITRISER L'ANALYSE DES COMPOSITES

Le comportement structural des matériaux composites impose des solutionsanalytiques complexes. Beaucoup de travail est fait en ce sens et ces efforts permettent d'étendre à ces matériaux des applications de plus en plus sévères.

CARACTERISATION DES MATERIAUX

Il s'agit d'une part d'élargir les connaissances des matériaux de base, mais aussi de prendre avantage des expériences passées ou en cours de réalisation.

L'accumulation de toutes ces données est un outil essentiel pour élaborer de nouvelles applications avec plus d'assurance et pour en minimiser les risques.

NOUVEAUX MATERIAUX

Bien que les thermodurcissables soient loin d'avoir atteint leur potentiel maximum, il faut compter avec l'avènement des thermoplastiques à fibres longues. Ces matériaux, qui dans certains cas sont adaptés à la technique de moulage par autoclave, risquent de modifier sensiblement les champs d'application de cette technique.

Dans les précédents chapitres, seuls les thermodurcissables furent discutés, si les thermoplastiques ont été ignorés c'est que leur importance et leur potentiel justifient un traitement spécifique, qui est fait plus loin.

POTENTIELS POUR DES MATERIAUX "ECONOMIQUES"

Le moulage des prepregs présente des avantages évidents aux niveaux du contrôle de la formulation et dans le contenu et l'orientation du renfort.

D'autre part, le moulage sous vide (vacuum bag) permet d'obtenir des laminés à plus haute teneur en fibres que ceux faits par moulage contact et de ce fait, ont une meilleure résistance mécanique.

Ces raisons font en sorte que pour certaines applications structurales, les prepregs sont des solutions garantissant de meilleurs résultats que les techniques conventionnelles de moulage contact. Or le problème vient du coût élevé des prepregs époxys.

On pense alors aux prepregs à base de polyester, mais le problème vient du fait que ces matériaux ne peuvent être amenés à un état "B-stage" comme c'est le cas avec les époxys.

Des matériaux qui font un pas dans la direction des prépregs "B-stage" polyesters sont ceux mis au point par BASF et qui se polymérisent sous l'action de rayons U.V.

Ces matériaux furent décrits dans une conférence donnée par messieurs Scholz et Koser, en 1984 au "39 th Annual Conference Composite SPI".

Bien que ces matériaux n'aient pas été alors présentés comme des résines conçues pour le vacuum bag, ils présentent néamoins un intérêt permettant de penser à une telle alternative.

Dans le cas ou une telle technologie deviendrait applicable, elle pourrait permettre un débouché intéressant sur des prepregs "économiques" adaptés à des situations structurales plus courantes.

De telles applications seraient entre autres celles rencontrées dans les transports, dans la fabrication des coques de voiliers ou dans toutes autres applications structurales plus sensibles aux coûts que celles des secteurs de l'aéronautique.

MOULAGE TPFL

LES THERMOPLASTIQUES ARMES DE FIBRES LONGUES (TPFL)

Les matériaux composites à fibres longues sont ceux dont les renforts ont plus de 1/2" de longueur.

L'intégration de telles fibres aux polymères implique que les matrices soient des "liquides" mouillant la fibre et se polymérisent en l'emprisonnant. Jusqu'à récemment, seulsles thermodurcissables pouvaient s'accomoder de cette contrainte.

Les matrices thermodurcissables, malgré certaines qualités spécifiques à ces matériaux, sont généralement moins flexibles et plus "cassantes" que les matrices thermoplastiques.

La haute viscosité des thermoplastiques et les risques de dégradation reliés à leur mise en forme ont longtemps limité l'utilisation de celles-ci en conjonction avec les fibres longues.

Des recherches sont faites par divers groupes pour permettre l'intégration de matrices thermoplastiques avec des fibres longues. Ce travail aboutit à une gamme de nouveaux matériaux, dont les performances sont très prometteuses.

Déjà certains de ces matériaux ont dépassé le stade de la recherhe et ont franchi avec succès le seuil de la commercialisation. C'est le cas, par exemple du "AZDEL", fait de polypropylène et de fibres de verre.

Toutefois, la mise au point de cette nouvelle classe de matériaux, les secrets de fabrication qui les entourent et les tâtonnements technologiques reliés à leur mise en production, ont favorisé l'émergence d'une terminologie nouvelle qu'il faut d'abord préciser avant d'analyser les particularités propres à ces matériaux composites.

NOMENCLATURE DES THERMOPLASTIQUES A FIBRES LONGUES

Cette liste, bien que partielle, donne un apercu de quelques noms les plus souvent rencontrés dans les revues spécialisées.

TPFL.....THERMOPLASTIQUES A FIBRES LONGUES

Ce terme est limité à ce dossier et il englobe tous les types de th.plastiques à fibres longues.

TRE.....THERMOPLASTIQUES RENFORCES ESTAMPABLES

Nom utilisé dans les revues françaises décrivant principalement les feuilles imprégnées de thermoplastique et à renforts isotropiques.

FIT.....FIBRES IMPREGNEES THERMOPLASTIQUES

Nom utilisé dans les revues françaises décrivant les feuilles à renforts tissés ou unidirectionnels.

ACTP.....ADVANCED COMPOSITE THERMOPLASTIC

Terme souvent rencontré dans les revues américaines et couvrant surtout les th.plastiques haute performance ou ceux sous forme de prepreg.

GFTP.....GLASS FILLED THERMOPLASTIC

Nom utilisé dans quelques revues aux USA et traitant tous les types de th.plast. à fibres longues ou courtes.

AZDEL.....NOM COMMERCIAL, "GE/PPG"

Matrice polypropylène et renfort de verre isotropique.

NOMENCLATURE (SUITE)...

RYTON.....NOM COMMERCIAL, "PHILLIPS"

Matrice polyphénylène sulfide et renforts de carbone ou de verre, isotropiques ou tissés.

ACP-2.....NOM COMMERCIAL, "ICI"

Tissus prepregs, unidirectionnels faits de PEEK et de renforts de carbone

FIBEROD...NOM COMMERCIAL, "PCI"

Tiges unidirectinnelles, souvent faites de nylon et de verre.

NCS.....GRADE COMMERCIAL, "JBM"

Quelques NCS sont faits de tissages combinant les fils thermoplastiques et des renforts de verre ou de carbone.

DISTINCTION DES TYPES DE TPFL

Globalement les thermoplastiques à fibres longues peuvent se regrouper en deux grandes familles, chacune ayant une foule de variantes. Ces familles sont:

- THERMOPLASTIQUES RENFORCES ESTAMPABLES
- TISSUS THERMOPLASTIQUES THERMOFORMABLES

THERMOPLASTIQUES RENFORCES ESTAMPABLES

Il s'agit de matrices thermoplastiques chargées de fibres longues et isotropiques, telles que du verre en filament continu. Le contenu de fibre peut varier de 20 à 60%, selon le grade.

Les principaux matériaux sont les "AZDEL" et certains "RYTON".

Le moulage de ces matériaux se fait sous presse, à haute pression, à la manière du moulage des SMC ou de l'estampage du métal. Selon le mode de moulage, (haute ou basse pression), il est possible de produire des configurations complexes et des variations d'épaisseur.

TISSUS THERMOPLASTIQUES THERMOFORMABLES

Ce sont des matrices thermoplastiques contenant des fibres longues, qui peuvent être alignées ou tissées. Selon le type, leur moulage se fait par compression, sous presse ou en autoclave.

Les technologies de moulage et le design des pièces moulées avec ces matériaux, se rapprochent de celles typiques aux prepregs.

Les plus connus de ces matériaux sont les prepregs "ACP-2", les tissus croisés ou unidirectionnels en "RYTON" et les "FIBEROD".

ASPECT PHYSIQUE DES TPFL AVANT MOULAGE

Il semble que la technique de production de ces composites thermoplastiques à fibres longues puisse suivre trois voies, conduisant à des matériaux de même nature mais aux propriétés distinctes, et dont les modes de transformation peuvent sensiblement différer. Ces méthodes sont:

IMPREGNATION MATRICE/RENFORT

C'est la technique utilisée pour les matériaux les plus connus, soit les "AZDEL", les "ACP" de ICI ou les "RYTON" de PHILLIPS. La matrice et la fibre de renfort sont liés par des techniques propriétaires, mises au point par ces compagnies, ce qui explique la maigre information sur celles-ci.

Cette forme s'adapte autant aux matériaux estampables (généralement isotropiques) qu'aux matériaux moulables par compression ou par autoclave (généralement en tissus ou unidirectionnels)

TISSAGE HYBRIDE FILS TH.PLAST/RENFORT

Cette approche consiste à tisser ensemble des fils de verre ou de carbone avec des fils de thermoplastique, au moulage à chaud, les th.plast. pénètrent la structure tissée et se figent en un composite. JB MARTIN produit de tels matériaux.

Pour éviter la perte de la structure tissée sous le mouvement de la matrice chaude, ces tissages sont de types multi-couches.

DEPOSITION DE POUDRE TH.PLAST SUR LE RENFORT

Basés sur une technique d'imprégnation mise au point par AUTOCHEM, les fils de renfort sont enrobés d'une poudre thermoplastique qui est à son tour emprisonnée dans une gaine non-liée au renfort.

DETAIL DES SYSTEMES DE THERMOPLASTIQUES A FIBRES LONGUES

Bien qu'ils se regroupent sous la classification de thermoplastiques à fibres longues, ces matériaux, en plus de se distinguer par leur composition sont souvent fort éloignés les uns des autres, au niveau des techniques de mise en forme.

Il est donc difficile de trouver un dénominateur commun facilitant l'analyse des divers groupes.

Enfin, la technologie étant dans plusieurs cas très nouvelle ou même en plein développement, il n'est pas aisé de standardiser des procédures de moulage applicables à un large groupe de systèmes matrice/renfort.

Compte tenu de ces contraintes et afin de permettre un maximum de clareté dans l'étude de ces matériaux, ce chapitre les traitera par principaux types commerciaux.

Dans l'ensemble, les procédés permettant de mouler ces matériaux sont l'une ou l'autre des techniques suivantes:

- Estampage (haute pression)
- Thermoformage (basse pression)
- Presse-clave/autoclave

Les matériaux choisis pour fin d'analyse et qui semblent être représentatifs, tant au niveau des procédés que des caractéristiques propres aux TPFL, sont:

- AZDEL
- RYTON
- APC-2

La section suivante reprend ces matériaux en précisant leurs aspects physiques ainsi que leurs techniques de moulage et leurs applications types.

LES TECHNIQUES DE MOULAGE DES TPFL

THERMOPLASTIQUES A FIBRES LONGUES

ESTAMPABLES (TRE)	THERMOFORMABLES	PRESSE-CLAVE (FIT)
* AZDEL et AZMET STX (discontinué) RYTON isotropique ISO-GMT-PA et PET HDPE "lofted type"	* RYTON La majorité des TPFL :(pour les pièces admettant un fini "industriel" et ayant une forme relativement simple)	* APC-2 SPIFLEX Tous les prepregs thermoplastiques à fibres tissées ou unidirec.
RENFORTS	RENFORTS	RENFORTS

* noms commerciaux

AZDEL

MATERIEL

TYPE

AZDEL est un des thermoplastiques à fibres longues ayant la plus grande notoriété. Développé conjointement par General Electric et PPG aux USA, ce matériel est fait d'une matrice polypropylène et de renforts en fibre de verre.

Le ratio verre/résine est de 40/60 en poids et le renfort est de type "mat" isotropique. Le matériel se présente en feuilles ou en retailles de 52" x 96" dont l'épaisseur est de 0.145".

Le AZDEL est souvent comparé au SMC, avec lequel il est en compétition. A ce chapitre, le AZDEL est sensiblement supérieur au SMC à l'impact, que le SMC son poids spécifique est plus faible et il a une durée en entreprôt quasi illimitée. Par contre, le AZDEL est de 1.5 à 2 fois plus cher que le SMC et sa tenue en température (chaud ou froid) est beaucoup moins bonne que celle du SMC.

CARACTERISTIQUES

GRADES

AZDEL P-100 (naturel)
AZDEL P-110 (gris foncé)
AZDEL P-112 (noir)

PROPRIETES

Spec. gravity	1.19
Rés. tension (psi)	14,000
Rés. flexion (psi)	24,000
Mod. flexion (psi)	800,000
Izod impact (lbs-pi/po)	14
HDT @ 264 F	310
Retrait au moulage (po/po)	0.002 @ 0.003

PRINCIPALES VARIANTES

AZMET

C'est une matrice PBT, mise au point par le groupe AZDEL INC. offrant de meilleures propriétés mécaniques que le PP. Le module en flexion serait de 1,200,000 en comparaison avec 800,000 pour le AZDEL.

AZLOY

Il s'agit d'une matrice faite en thermoplastiques d'ingénierie, aussi développée par AZDEL INC. Le matériau est encore en phase de mise au point et on compte surtout sur ses propriétés de résistance au feu, pour sa mise en marché.

RYTON

Compte tenu de l'importance de ce matériel à base de PPS/verre ou carbone et mis au point par PHILLIPS, il sera traité en détail dans le chapitre qui suit.

ISO-GMT-PET

Ce matériau a une matrice en PET et des renforts en verre dont la teneur est de 30%. Il fut développé conjointement par les groupes européens: ISOPORT et AKZO.

ISO-GMT-PA

C'est un autre produit du groupe ISOPORT/AKZO basé sur une matrice en polyamide. Ce matériel a une meilleure tenue au froid que ceux à base de polypropylène. Comme pour le précédent matériel, le taux de verre est de l'ordre de 30%.

"HDPE LOFTED TYPE"

C'est un matériau mis au point par DOW et à base de HDPE. Son moulage se fait à très basse pression, ce qui donne une sorte de "structure allégée" à faible densité. Les applications servent entre autres pour le moulage de composantes servant à l'absorption du bruit.

MOULAGE

OPERATION

Le moulage du AZDEL se fait par compression, en moule fermé. La technique ressemble à la fois à l'estampage du métal et au moulage du SMC. Les quatre phases de l'opération sont:

- Préparation de la charge (BLANK)
- Chauffage du matériel
- Compression de la charge de matériel
- Refroidissement et démoulage

Le temps total pour un cycle de moulage, soit la localisation de la charge, la compression et le démoulage, peut varier de 25 à 45 secondes.

PREPARATION DE LA CHARGE

La matière en feuille doit être découpée en une "charge" qui sera placée sur le moule et compressée. La configuration de la charge est un critère déterminant dans la qualité de la pièce moulée. Les éléments à tenir compte dans cette configuration sont les suivants:

- Ne recouvrir que les sections horizontales du moule, sans le draper.
- Ne pas plier les feuilles de matière, afin de ne pas nuire au fluage de la matière.
- Pour les pièces complexes, minimiser le nombre de charges placées côte à côte, afin d'éviter la formation de lignes de jointage au moulage.

CHAUFFAGE DU MATERIEL

Les feuilles de AZDEL doivent être chauffées entre 380 et 420 F. Cette température doit être atteinte rapidement, soit entre 90 et 180 secondes. Après ce temps, les feuilles doivent être placées sur le moule et compressées.

Le temps entre la sortie du four et le moulage ne doit pas dépasser 15 secondes. Pour que le chauffage se fasse rapidement, il est préférable qu'il soit fait par infrarouge et que les feuilles individuelles soient chauffées.

COMPRESSION DE LA CHARGE

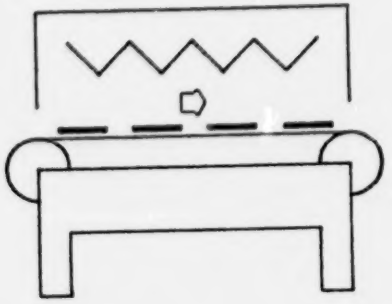
La compression doit se faire très rapidement de manière à éviter que le matériel ne refroidisse avant de remplir la cavité.

La vitesse de fermeture en phase finale, doit être entre 20 et 80 pouces à la minute. La pression dans la cavité doit être entre 1600 et 2000 psi.

REFROIDISSEMENT ET DEMOULAGE

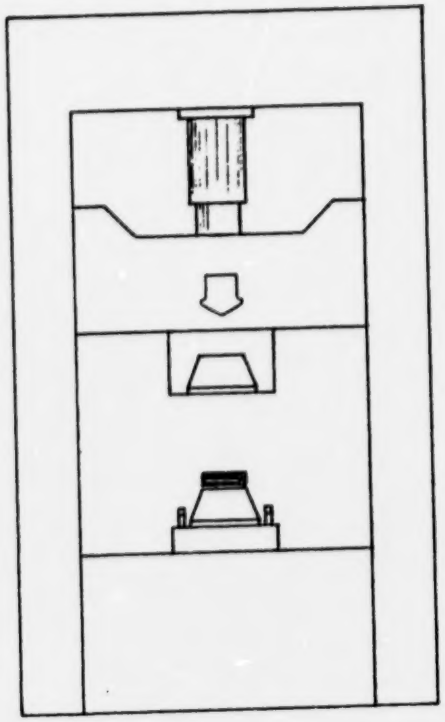
Le moule est maintenu entre 80 et 140 F. Le matériel étant chargé à 400 F et compressé, il résulte un refroidissement rapide de la pièce. L'éjection peut être faite par des tiges d'éjection localisées dans le moule.

SCHEMA DU MOULAGE
PAR ESTAMPAGE



FEUILLES
TPFL

FOUR AVEC TAPIS MOBILE



CHARGE

PRESSE A ESTAMPAGE

EQUIPEMENTS DE MOULAGE

PRESSES

Telle que mentionné plus haut, la capacité de la presse doit permettre d'appliquer entre 1600 et 2000 psi dans la cavité. La presse doit être munie de vitesses variables, dont le dernier palier de compression doit s'ajuster entre 20 et 80 IPM.

Les presses hydrauliques sont les équipement les mieux adaptés pour ce procédé. Elles doivent avoir une pression d'ouverture d'environ 20% de la pression de fermeture.

FOUR A CHAUFFAGE

Les feuilles sont chargées sur un tapis roulant grillagé qui circule entre les éléments infrarouges, qui sont généralement segmentés en trois zones de températures différentes.

La vitesse de mouvement du tapis doit être ajustée de manière à éviter de surchauffer la matrice. Cette vitesse est généralement entre 30 et 60 FPM.

MOULES

La configuration des moules est proche de celle du SMC. Les outillages doivent être en acier usiné, généralement des grades P-20 ou AISI 4140, sont utilisés.

Les moules sont à fermeture positive, avec sections télescopiques verticales. Ce système permet de maintenir une pression sur la matière durant son refroidissement et sa contraction.

La tolérance du pincement (Pinch off), doit être de 0.001" à 0.002" et sa profondeur "verticale", entre 0.300" à 0.500".

Le système de refroidissement est du même type que celui des moules pour injection des thermoplastiques, soit des lignes d'eau, dont le diamètre est souvent de 7/16".

APPLICATIONS

REGLES DE DESIGN

La conception des pièces doit tenir compte du mouvement du matériel durant la compression. Les principales règles de base sont les suivantes:

RAYONS MINIMUM.....1/32"

ANGLE DE DEMOULAGE.....1 à 3 degrés

EPAISSEUR MINIMUM.....0.090"

EPAISSEUR MAXIMUM (recommandée)...0.250"

Des épaisseurs de 1.4" furent atteintes à date

VARIATION D'EPAISSEUR.....3:1

GRANDEUR MAXIMUM DES PIECES.....60 p.c. (à date)

VOLUME MAXIMUM.....42 lbs (à date)

COLLAGE DE TISSUS AU MOULAGE.....possible

Tissus poreux, insérés dans le moule avant d'y placer la charge.

Il est aussi possible de localiser des coupons d'identification.

INSERTS MOULES.....possible

FINI TEXTURE.....possible

CONTRE DEPOUILLE.....possible

NERVURES.....possible

ratio hauteur/largeur

si largeur + 0.2" => ratio h/l = 4:1
si largeur = 0.13" à 0.2" => ratio h/l = 3:1
si largeur - 0.13" => ratio h/l = 2:1

RETASSURES (SINK MARKS).....oui

APPLICATIONS TYPES

Le premier marché visé par AZDEL est celui des pièces automobiles non-apparentes, telles que:

- Coquille de siège
- Cabaret à batterie
- Section de plancher
- Cloison absorbante de bruit
- Poutre de pare-choc

A titre d'exemple, les voitures Chevrolets "Corvette" 1986 ont chacune, 40 lbs de composantes moulées en AZDEL.

Le groupe AZDEL vise aussi les autres secteurs industriels, pour la fabrication de produits tels que des containers, des boites, des supports ou des pièces structurales.

En général les promoteurs de ces matériaux visent en premier lieu les marchés déjà couverts par les SMC.

Le champ d'application des thermoplastiques à fibres longues est encore relativement mal défini. Les caractéristiques de ces matériaux sont souvent au stade d'évaluation et leur potentiel reste à explorer.

Il est probable que l'introduction de nouvelles matrices, permettra un élargissement des marchés couverts. Par exemple, l'utilisation des PBT au lieu du PP (AZMET vs AZDEL) permettrait d'utiliser ces matériaux dans des applications structurales et dans des conditions de température plus variés.

Parmi les principales matrices thermoplastiques qui reviennent dans les documentations et qui sont soit en phase de commercialisation ou de développement, il faut citer.

- POLYAMIDE
- POLYETHYLENE
- POLYPHENYLENE OXYDE
- POLYBUTHYLENE TEREPHTALATE
- POLYPHENYLENE SULFIDE

RYTON

MATERIEL

TYPE

Les thermoplastiques à fibres longues de la famille RYTON ont une matrice en Polyphenylene Sulfide et des renforts en verre ou en carbone. Ils sont développés et produits par la firme PHILLIPS PETROLEUM.

Ces ACTP sont relativement nouveaux, et sont classés en deux familles qui se distinguent par leurs types de renfort, et de ce fait par leurs méthodes de mise en forme:

- Types à fibres isotropiques
- Types à fibres orientées

RYTON A FIBRES ISOTROPIQUES

Ils sont chargés de fibres en verre ou en carbone, dont les longueurs peuvent être de 1" jusqu'à des filaments continus. Ces fibres sont toutefois distribuées au hasard, à la manière du MAT.

Les matériaux de cette famille sont:

AG10-20	20% verre en filaments coupés
AG20-40	40% verre en filaments continus
AC10-20	20% carbone en filmanents coupés

RYTON A FIBRES ORIENTEES

Ce sont des tissus imprégnés (prepregs) à base de PPS armés de verre ou de carbone, tels que:

AG30-40	verre à tissage "plain"
AG31-40	verre à tissage "satin"
AC30-60	carbone à tissage "plain"
AC31-60	carbone à tissage "satin"

CARACTERISTIQUES

Les caractéristiques du RYTON sont en fonction de l'orientation et du type de renfort utilisé. Ils faut aussi noter les remarquables propriétés physiques données par la matrice PPS, qui sont:

- Très bonne résistance chimique même à haute température (400 F)

- Excellente tenue au feu, faible fumée et peu toxique en condition de feu.

PROPRIETES	AG20-40	AC10-20	AG30-40	AC30-60
Renforts	verre 40 % mat	carbone 20% mat	verre Tissu	carbone Tissu
Spec. gravity	1.66	1.36	1.66	1.60
Rés. tens (psi)	23,000	29,000	26,000	75,000
Rés. flex (psi)	34,500	31,000	21,000	93,000
Mod. flex (ksi)	1,800	1,700	2,160	6,800
Izod impact (n-u)	14-25	1.3-5	8-17	12-21
HDT @ 264 F	523	527	523	536
Retrait moulage	0.002	0.002	0.002	0.002

PRINCIPALES VARIANTES

Les composites RYTON touchent aux deux grandes familles définies au début de cette section, i.e. les thermoplastiques "estampables" et ceux "thermoformables".

Leurs variantes, sont en fait toutes les autres classes décrites dans ce dossier sur les TPFL, c'est à dire des AZDELS aux ACTP de type APC-2.

On ne peut donc pas définir des groupes spécifiques directement ou de proches compétiteurs à cette classe de matériaux.

MOULAGE

MOULAGE VS STRUCTURE CRISTALLINE DU MATERIEL

La cristallinité du matériel influence ses propriétés physiques. Le PPS peut atteindre une forte cristallinité, surtout lorsque il est moulé contre un moule chaud ou en paroi épaisse. Le temps de refroidissement lent, laisse plus de temps au réarrangement moléculaire.

Les propriétés résultantes du niveau de cristallinité sont les suivantes:

PROPRIETE RESULTANT D'UNE HAUTE CRISTALLINITE

- Grande stabilité dimensionnelle
- Résistance mécanique légèrement moindre
- Meilleure tenue en température
- Forte résistance au fluage

La cristallinité du PPS peut être améliorée par un recuit de 1 à 2 heures entre 400 et 450 F.

Ce phénomène de cristallinité, s'applique à plusieurs autres matériaux, tels que les PP et les PEEK, traités dans ce dossier.

OPERATION DE MOULAGE

La double nature, "isotropique" ou "orientée" que peuvent avoir les composites RYTON impose une technique de moulage spécifique à chaque type.

- COMPRESSION (ESTAMPAGE)
- THERMOFORMAGE

MOULAGE PAR COMPRESSION (ESTAMPAGE)

Cette technique est dans ses grandes lignes, similaire à celles décrites dans le moulage du AZDEL. Seuls les paramètres d'ajustement des équipements étant spécifiques.

On en référera donc au chapitre sur le AZDEL pour ce qui est des types d'équipements et des procédures relatives à la préparation des patrons de charges.

Un cycle typique pour cette technique de moulage est entre 30 et 120 secondes.

En ce qui concerne les éléments particuliers au moulage du RYTON, ce sont les suivants:

1) Chauffer le moule entre 250 et 300 F et appliquer un enduit de démoulage entre chaque cycle

2) Préparer les patrons de charge (blanks), en fonction de la forme de la pièce à mouler et en prenant soin de minimiser les lignes de soudure.

3) Chauffer les feuilles individuelles en les faisant passer dans un four à infrarouges. Le matériel doit en 1 à 2 minutes atteindre la température de moulage, située entre 600-650 F.

Les feuilles de PPS RYTON étant plus minces que celles du type AZDEL (0.070" vs 0.145") il est possible d'empiler deux feuilles d'épaisseur pour le chauffage.

MOULAGE PAR COMPRESSION (ESTAMPAGE)...(SUITE)

4) Charger rapidement le matériel chaud dans le moule. Cette séquence doit être limitée à quelques 45 secondes pour garder le RYTON à plus de 550 F.

5) Fermer rapidement la presse et compresser le matériel. La vitesse de fermeture finale doit être entre 200 et 500 pouces à la minute. Selon la forme et la profondeur de la pièce, la pression dans la cavité sera entre 2000 et 6000 psi.

6) Refroidir le matériel dans le moule. Pour un moule à 300 F, le temps de refroidissement est de 25-30 secondes pour une pièce de 0.100" et 120-150 sec. pour une paroi de 0.200"

MOULAGE PAR THERMOFORMAGE

Dans le moulage par estampage, la matrice se déplace dans le moule entraînant la fibre. Cette technique s'applique bien aux renforts isotropiques, mais pour le moulage des feuilles avec renforts orientés, un déplacement trop grand de la matrice causerait une perte d'alignement des fibres, ou une séparation matrice/renfort.

La technique de moulage des tissus prepregs consiste donc à conformer la feuille, plutôt que de la forcer dans une cavité. C'est la technique de thermoformage. Les étapes de cette séquence de moulage sont les suivantes:

Préparer un "laminé" fait de prepregs empilés les uns sur les autres et "consolidés" en un laminé compact. Les techniques pour produire ce laminé sont l'une ou l'autre des méthodes suivantes:

- Laminage de plusieurs feuilles qui sont ensuite compactées sous presse, à 600 F durant 3 à 5 minutes et sous une pression de 100 à 150 psi.

- Laminage par vacuum bag ou en autoclave, à 550-600 F. sous une pression de 15 à 150 psi durant 10-30 minutes.

Placer le laminé dans un cadre de manutention.

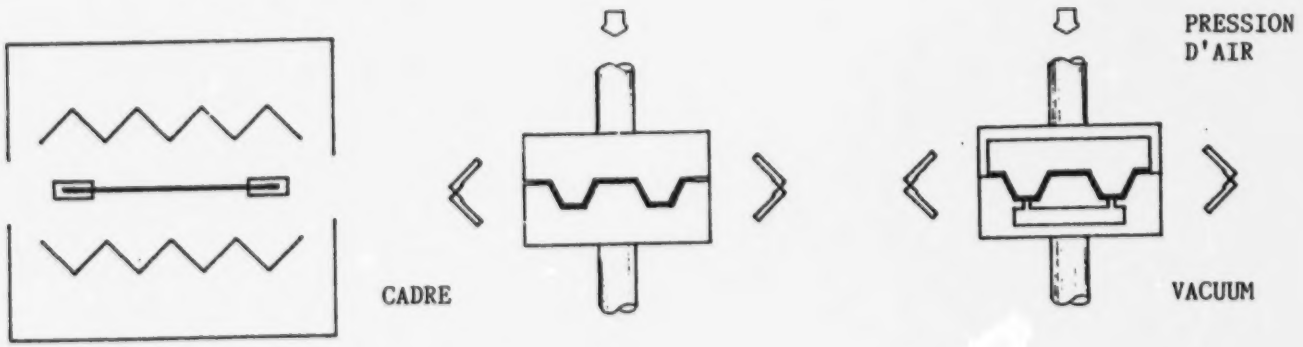
Chauffer le laminé dans un four infrarouge, pour qu'il atteigne 600 F.

Transférer rapidement le laminé chaud dans le moule.

Ouvrir le cadre de manutention, pour permettre à la feuille d'épouser plus aisément les contours du moule.

Soit par thermoformage sous vide avec pression d'air sur la pièce ou par compression entre moule mâle/femelle, la pièce est forcée à épouser la forme du moule. La pression de formage est de l'ordre de 15 à 50 psi.

SCHEMA DU MOULAGE PAR
THERMOFORMAGE



CHAUFFAGE AU FOUR

THERMOFORMAGE
A MOULE FERME

THERMOFORMAGE
PAR VACUUM ET
PRESSION D'AIR

EQUIPEMENTS POUR THERMOFORMAGE

SYSTEME DE "COMPACTION" DU LAMINE

Il peut s'agir d'une presse à compression, d'un système de vacuum bag ou d'un autoclave, où les pressions sont limitées à un maximum de 150 PSI.

Il est possible d'acheter directement des feuilles déjà compactées, ce qui élimine l'équipement et l'opération reliée à cette préparation.

FOUR

Comme pour le moulage par estampage, il faut des fours pouvant chauffer rapidement la matière. Pour cette raison on préfère les systèmes à infrarouge qui appliquent directement la chaleur à la feuille.

PRESSE

Ce sont des presses à compression, pouvant être munies de systèmes à vacuum et de pompesà pression, permettant un moulage du type "pressure bag moulding".

Ces presses hydrauliques, sont limitées à des pressions de 50 à 150 psi sur la pièce moulée.

MOULES

Les basses pressions permettent d'utiliser l'époxy, l'aluminium, le kirksite ou le silicone. Une technique économique consiste à produire la cavité avec un matériau rigide et le poinçon avec un élastomère de type silicone.

Le moule doit cependant être capable de résister aux hautes températures, soit jusqu'à 650 F.

APPLICATIONS

MOULAGE PAR ESTAMPAGE (REGLES DE DESIGN)

Les règles sont sensiblement les mêmes que celles énoncées dans le chapitre sur les AZDELS. Les particuliarités pour les RYTONS sont les suivantes:

RAYONS MINIMUMS.....0.050"

EPAISSEURS MINIMUMS.....0.075"

EPAISSEURS MAXIMUMS.....0.500"

Des pièces jusqu'à 2.5 pouces d'épaisseur furent déjà moulées.

VOLUME MAXIMUM (A DATE).....30 lbs

MOULAGE PAR THERMOFORMAGE (REGLES DE DESIGN)

Les règles de design sont semblables à celles prévalant pour le moulage des prepregs et qui furent traitées dans le chapitre sur le moulage par autoclave.

Les pièces doivent avoir une épaisseur uniforme, le moulage des nervures n'est pas possible.

La configuration des pièces doit être relativement simple. Les formes complexes ne permettant pas le drapage du matériel. Une règle empirique fixe la profondeur moulable à environ 50% de la plus faible des deux dimensions, soit de la longueur ou de la largeur de la pièce.

Il faut toutefois préciser, que le choix du tissage influencera la facilité de reproduire les formes. Par exemple, un tissé plus délié facilite l'habillage des sections en contour.

En ce qui a trait à la taille des pièces, compte tenu du faible coût des moules, elle n'est limitée que par la grandeur de l'équipement disponible.

APPLICATIONS TYPES

La récente commercialisation de cette classe de matériaux fait en sorte que les applications sont souvent du domaine du "potentiel".

Compte tenu du coût élevé de ce matériau et de ses hautes performances, il est à prévoir qu'il demeurera surtout intéressant pour les domaines des produits haut de gamme ou pour les applications où seules les caractéristiques du PPS le rendent compétitif.

AERONAUTIQUE

La résistance mécanique, la faible densité et la très bonne tenue au feu sont les facteurs favorisant le RYTON pour ce marché.

Les pièces types sont des dossiers de sièges, des portes d'accès aux instruments et des masques de fenêtres. Cette dernière application permet l'utilisation de la technique de thermoformage.

EXPLOITATION PETROLIERE

L'excellente tenue chimique et la résistance mécanique des PPS sont les éléments mis à profit dans ce secteur. Des valves, des raccords de tuyauterie et des pièces d'équipements sont déjà en évaluation.

MILITAIRE

C'est un domaine où on peut prendre avantage des PPS pour le moulage de radome, de protecteurs balistiques ou pour les casques de sécurité.

AUTOMOBILE

Ici nous les retrouvons surtout pour les petites pièces à haute performance localisées sur les moteurs.

INDUSTRIEL

Ils sont employés dans les composantes structurales exposées à de hautes températures ou à des conditions chimiques sévères.

MATERIEL

TYPE

Les APC (Aromatic Polymer Composite) sont des thermoplastiques à fibres longues, faits d'une matrice PEEK (Polyetheretherketone) et de fibres de carbone unidirectionnelles.

Ce matériau haute performance fut mis au point par la firme ICI. Il consiste en fibres de carbone imprégnéesde PEEK par une technique mise au point par ICI. Ce prepreg est disponible en ruban.

CARACTERISTIQUES

Le PEEK est une matrice aux propriétés élevées. En la combinant avec une fibre aux propriétés mécaniques élevées, comme celle de la fibre de carbone, on obtient un composite aux propriétés remarquables.

Les composites APC-2 ont les propriétés suivantes:

Poids spécifique	1.58
Rés. tension (psi)	242,000
Module flex (ksi)	14,400
HDT 264 psi F	600 +

Ces matériaux, contrairement aux composites à base d'époxy, ne subissent pas de plastification en milieu humide.

La résistance chimique des PEEK leurpermet de résister à un large éventail de contaminants. Les composites APC ont une bonne résistance à l'impact et en fatigue et ont un faible fluage.

Enfin ils ont une exeptionnelle tenue au feu et un très faible taux d'émission de fumée.

VARIANTES DES APC-2

Il y a toute une gamme de prepregs haute performance qui sont en voie de mise au point. Ceux-ci se distinguent soit par leur combinaison matrice/renfort ou par leur mode d'imprégnation.

COMBINAISON MATRICE/RENFORT

Les renforts sont surtout limités aux verres, carbones et aramides, par contre le choix des matrices est beaucoup plus vaste.

Mis à part les PEEK discutés dans ce chapitre et les PPS et PP analysés précédemment, les matrices sont, pour ne nommer que les plus souvent considérées:

Polyethersulfone	PES
Polysulfone	PS
Polyetherimide	PEI
Polyimide	PI
Polyester	PETG

Chacune de ces matrices offre des propriétés spécifiques à sa classe de polymère. De plus, en les combinant avec des fibres de renfort, on obtient dans plusieurs cas des propriétés mécaniques très élevées.

Pour fin de référence, le tableau suivant donne des propriétés comparatives pour des prepregs unidirectionnels.

	PET/ver	PA/ver	PPS/car	PEEK/car	PI/car
Résistance tens. (ksi)	110	92	170	242	220
Module flex. (ksi)	5,100	4,200	18,000	17,400	18,000

MODE D'IMPREGNATION MATRICE/RENFORT

IMPREGNATION DANS LA MASSE

La plus répandue est l'imprégnation de la fibre dans la masse thermoplastique. Ces techniques font l'objet de plusieurs techniques "propriétaires" mises au point par les fournisseurs.

L'imprégnation est entre autre utilisée pour les AZDEL, RYTON, SPIFLEX, ACP-2 et plusieurs autres systèmes en cours de commercialisation.

SANDWICH FILM TH.PLAST RENFORT

Cette technique de moins en moins utilisée, consiste à alterner les couches de renfort tissées entre des films thermoplastiques. Au moulage il y a imprégnation et formation du composite.

CO-TISSAGE

Plusieurs thermoplastiques peuvent être mis en fils et incorporés au tissage des prepregs. Ces techniques font généralement appel à des croisés tridimensionnels. Les fils thermoplastiques peuvent occuper une couche entière ou être répartis avec les autres fils de renfort.

Cette méthode est au stade de caractérisation et elle s'avère intéressante, particulièrement au niveau du dosage du ratio matrice/renfort qui est très facile dans ce système.

Une des variantes du co-tissage serait d'utiliser des filaments hybrides, faits de renforts et de thermoplastique. Cette méthode est toutefois plus complexe à produire.

IMPREGNATION POUDRE

Une poudre thermoplastiques déposée sur les fils et le tout peut être gainée ou non, afin d'assurer une bonne cohésion.

Le dosage est plus difficile que dans la technique de co-tissage. Cette voie est tout de même suivie par certains tisserands.

MOULAGE

Certains des avantages offerts par les prepregs TPFL en rapport à ceux à base d'époxy, sont:

- Rapidité de moulage, permise par le fait que la polymérisation n'est pas faite durant la mise en forme.

- Longue vie en entreposage et stabilité des prepregs thermoplastiques, dues au fait qu'ils sont déjà polymérisés.

Par contre, le moulage des thermoplastiques nécessite des raffinements aux équipements utilisés pour les composites thermodurcissables.

Par exemple, les températures sont beaucoup plus élevées, mais leur durée doit être rigoureusement contrôlée pour permettre une mise en forme convenable sans provoquer de dégradation de la matrice.

Les systèmes par autoclave, normalement utilisés pour les composites thermodurs, doivent être modifiés pour les ACTP.

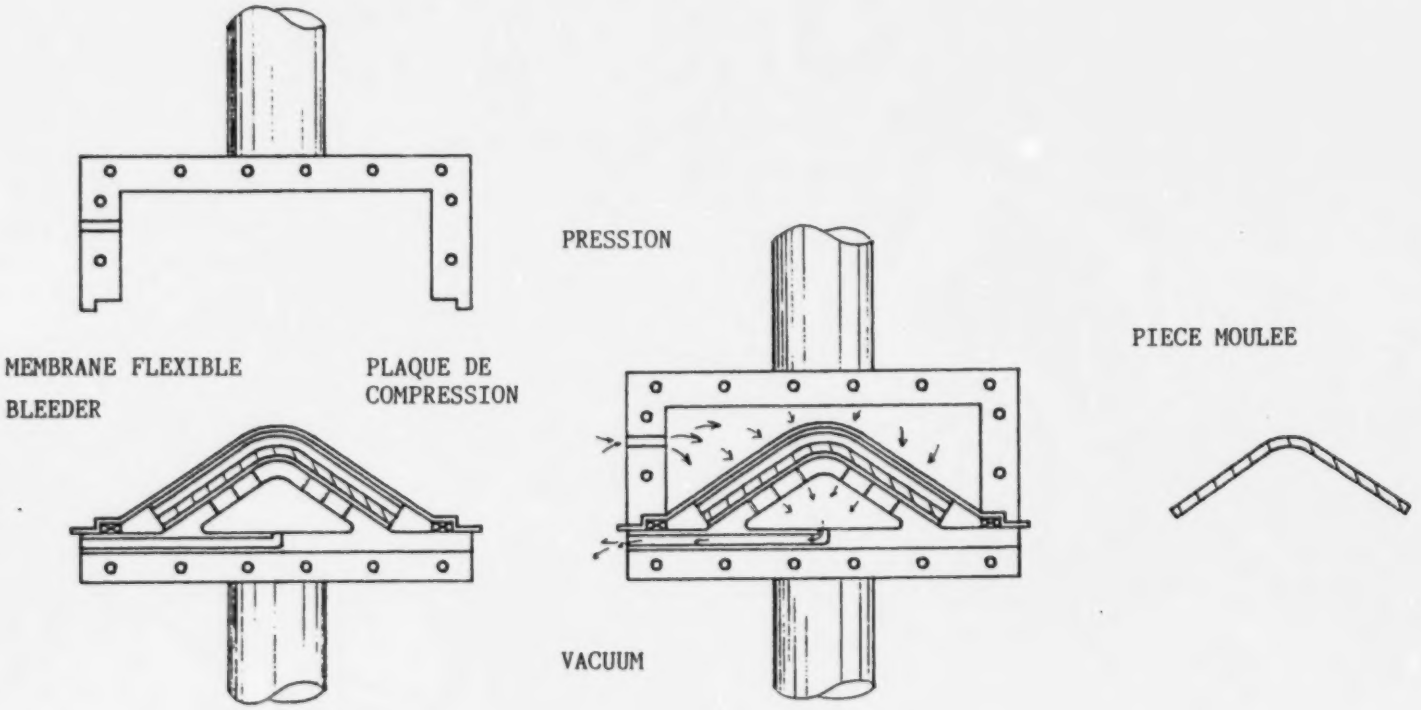
Un système intéressant, proposé pour le moulage des ACP-2, consiste en une presse-clave.

Le moule installé sur une presse, est surmonté d'une chambre à compression qui se referme sur la cavité en coinçant la membrane de "vacuum bag".

Le moulage consiste à faire le vide sous la membrane, tel que dans la technique par autoclave en même temps que de bâtir une pression derrière la membrane pour aider à former la pièce.

Une plaque de compression (Caule plate) est utilisée pour aider à la mise en forme du prepreg.

Comme dans l'autoclave traditionnel, on utilise des films démoulants, des membranes flexibles et des "bleeders" et "breathers". Il faut toutefois choisir des matériaux pouvant supporter les hautes températures atteintes au moulage.



SCHEMA DU MOULAGE PAR PRESSE-CLAVE

DETAIL DE L'OPERATION DE MOULAGE

Le cycle de moulage comprend trois phases:

- BAGGING
- CHAUFFAGE DU PREPREG
- STABILISATION (DWELL)
- REFROIDISSEMENT

BAGGING

Le prepreg est déposé dans la cavité, généralement sur des films séparateurs et des tissus absorbants (bleeders). D'autres films et tissus séparateurs et des plaques de compression sont localisés sur le laminé. Il est finalement recouvert de la membrane flexible qui vient se coincer sur les mastics d'étanchéité.

Le vacuum est ensuite appliqué pour forcer le sac contre le prepreg.

CHAUFFAGE

Les plateaux de la presse sont chauffés afin que le matériel atteigne une température de 715 F. Le temps pour obtenir ce palier peut prendre de 15 à 30 minutes.

Cette étape se fait alors que le composite est sous vacuum.

STABILISATION

Cette étape vise à assurer une stabilisation de la température dans tout le laminé et de permettre un certain mouvement de la matrice.

Durant cette phase, la pression est appliquée derrière la membrane, alors que le vacuum est maintenu sous celle-ci. Ce double effet favorise la compaction du laminé.

Le temps de stabilisation peut varier de 10 à 30 minutes. Selon la configuration de la pièce à mouler, la pression sur la membrane sera de 30 à 60 psi.

REFROIDISSEMENT

Alors que le vacuum est maintenu sous la membrane, la pression est relachée et le refroidissement débute.

Cette étape est cruciale sur les qualités du produit moulé, car la vitesse de refroidissement influence sur le taux de cristallinité du PEEK.

La vitesse de refroidissement doit être au moins de 18 F à la minute, autrement il en résultera une trop forte cristallisation de la matrice et une réduction de ses propriétés mécaniques.

EQUIPEMENT DE MOULAGE

PRESSE-CLAVE

Il s'agit d'une presse hydraulique, dont la capacité est relativement faible, les pressions ne dépassant pas 60 psi sur la pièce.

La presse doit être munie de plateaux chauffants et d'un système de contrôle précis de la température des plateaux et du prepreg.

Les plateaux doivent être conçus pour permettre un refroidissement rapide; le chauffage et le refroidissement se faisant par un médium fluide.

EQUIPEMENT DE BAGGING

Les matériaux de bagging doivent supporter des températures de l'ordre de 750 F. Les membranes flexibles sont généralement des polyamides, tels que le KAPTON de DUPONT.

Les tissus absorbants (bleeders) ne servent pas à éponger un excès de résine, mais uniquement à assurer la ventilation pour une application uniforme de la pression.

A moins d'utiliser des PTFE, les "bleeders" ne doivent pas être en contact avec le prepreg afin d'éviter toute adhésion. Des films démoulants sont toujours employés.

MOULES

Les moules ne subissent pas de fortes pression, leurs principale contrainte étant la température. Aussi des matériaux tels que l'aluminium sont acceptables pour cette application.

Les moules doivent avoir des orifices de vacuum, généralement de 1/64" de diamètre.

Il faut surtout concevoir les moules pour assurer un échange de chaleur rapide et efficace. Il est important de chauffer rapidement et de refroidir rapidement le prepreg.

PLAQUE DE COMPRESSION (CAULE PLATE)

La plaque de compression permet de contrôler la répartion de la matrice de manière à éviter les étranglements ou les pertes locales de l'épaisseur.

Le design de cet accessoire doit donc être fait en fonction de la pièce à mouler, de manière à bien épouser la forme du laminé "compacté".

La plaque de compression peut être en métal, afin de supporter la température en appliquant une pression uniforme sur le laminé.

DESIGN

REGLES DE DESIGN

La haute teneur en fibres (jusqu'à 60% en volume) et leur orientation unidirectionnelle, sont des facteurs qui limitent les formes des pièces moulables avec ces matériaux.

Règle générale, les données concernant le moulage des prepregs et celui des RYTONS par thermoformage s'appliquent aux APC-2, mais toujours en considérant des formes simples.

Les formes à doubles courbes sont difficiles à obtenir et nécessitent parfois l'utilisation de préform fait sous presse.

Quant à la taille des pièces elle est limitée par la presse-clave disponible.

DOMAINES D'APPLICATION

Les coûts élevés de ces matériaux, leur complexité de mise en forme et les performances qu'ils permettent les classent dans la catégorie des composites à haute performance.

Les secteurs de l'aérospatiale, l'aéronautique et militaire sont les principaux champs où l'on voit des applications potentielles.

Les quelques applications en cours sont surtout dans ces secteurs et bien souvent il s'agit de pièces expérimentales.

Un des exemples est une porte de compartiment sur les avions de chasse F-16. Celle-ci est faite en Polyimide/carbone.

Une pièce type faite en PEEK/carbone est le bord d'attaque des stabilisateurs verticaux sur les véhicules "HOVERCRAFT". Cette configuration remplace l'aluminium.

Comme il y a trois variantes importantes de ces techniques, soit celles par estampage, par thermoformage ou par presse-clave, l'analyse et la simulation de ces techniques doivent respecter cette segmentation.

Toutefois, certains paramètres sont communs aux trois procédés et ce sont ceux reliés aux matériaux thermoplastiques.x

PARAMETRES COMMUNS AUX TROIS SYSTEMES

MORPHOLOGIE DU POLYMERE

Certains thermoplastiques peuvent atteindre un fort taux de cristallinité. Or cette structure est temporairement perdue lorsqu'ils sont chauffés au dessus du point de fusion et elle se refait durant la phase de refroidissement.

Cependant, la vitesse à laquelle le polymère est refroidi modifie sensiblement son niveau de cristallinité.

Cette vitesse de refroidissement est entre autre influencée par les éléments suivants:

- MEDIUM D'ECHANGE THERMIQUE
- TEMPERATURE DU MOULE
- EPAISSEUR DES SECTIONS MOULEES
- TEMPERATURE DE LA MATIERE
- CONDUCTIVITE THERMIQUE

Les propriétés physiques du produit sont influencées par sa cristallinité et pour les optimiser on doit maintenir le produit dans une fourchette précise.

La séquence de moulage et l'ajustement des équipements devront donc tenir compte de ce facteur "cristallinité".

PHENOMENES RELIES AU CHAUFFAGE DU POLYMERE

Peu importe la technique de moulage, le thermoplastique doit être chauffé pour être mis en forme. Bien qu'il faille chauffer rapidement pour réduire les cadences de moulage, il est plus important de chauffer le moins longtemps possible pour ne pas dégrader la structure moléculaire du polymère.

L'analyse et la gestion des opérations de moulage, devront donc traiter de ces questions de chauffage du matériel, en tenant compte des éléments suivants:

- Epaisseur maximum pouvant être chauffée (cas des feuilles empilées dans le four)
- Propagation de la chaleur dans la masse Conductivité thermique
- Delta de température entre le centre et les faces du matériau et courbe de progression de la température
- Type de chauffage à utiliser: infrarouge, électrique ou autres
- Configuration du four, nombre de zones avec ajustement de chacune
- Temps limite entre la fin du "chauffage" et la mise en forme

PARAMETRES SPECIFIQUES AU MOULAGE PAR ESTAMPAGE

ECOULEMENT DE LA MATIERE

La forme et la localisation de la charge influencent grandement la qualité du produit fini. Malgré quelques études, ces paramètres sont encore largemement fonction des procédures essais et erreurs.

Il faut assurer un mouvement de la matière dans le moule, de manière à remplir toute la cavité mais il faut tenir compte du fait que la matière est chargée de fibres longues et qu'elle est déposée contre la surface d'un moule froid.

Comme les pièces sont souvent complexes, les charges doivent être placées en plusieurs endroits. Il y a alors formation de fronts de matière qui se rejoignent et se marient. Or ces plans de soudure ne sont pas structuraux et la performance de la pièce sera modifiée.

Les phénomènes d'écoulement et de configuration des charges sont des éléments clefs qui nécessiteront encore beaucoup d'études et d'analyses avant d'être maîtrisés.

FORME DES PIECES

Malgré le travail fait par les promoteurs, en ce qui a trait aux formes types moulables par estampage, il y a encore beaucoup de place pour la caractérisation des designs pouvant être produits par ce procédé.

PARAMETRE DE MOULAGE

Les vitesses et les pressions de fermeture des moules font aussi partie des éléments à préciser pour mieux saisir la portée et les contraintes spécifiques au moulage par estampage.

PARAMETRES SPECIFIQUES AU THERMOFORMAGE

Cette technique n'implique pas un écoulement de la matière, mais plutôt un drapage à chaud. Bien qu'en apparence, le procédé ressemble au thermoformage conventionnel, le fait d'employer une feuille chargée de renforts longs implique un traitement particulier.

Alors que dans le thermoformage des feuilles non chargées il y a amincissement de la feuille dû à l'étirement, dans le thermoformage des feuilles à fibres longues, il ne peut y avoir un étirement important, les fibres bloquant le mouvement.

Pour être forcée contre le moule, la feuille à fibres longues, doit être libérée de son cadre de manière à pouvoir être formée.

Il faut donc maîtriser, sinon caractériser, les mouvements possibles de la matière, dans ces conditions limitées.

PARAMETRES SPECIFIQUES AU PRESSE-CLAVE

Tel que mentionné, dans le thermoformage des matériaux contenant des fibres longues, la présence de celles-ci limitent l'étirement de la feuille.

Dans la technique du presse-clave en plus de mouler des feuilles à fibres longues, ces fibres sont tissées, ce qui limite drastiquement les possibilités de drapage.

La maîtrise de la technique passe donc par une compréhension des formes pouvant être drapées, en fonction des divers types de tissage.

POTENTIEL DES THERMOPLASTIQUES A FIBRES LONGUES

L'intérêt commercial d'une technique ou d'un matériau, dépend de sa capacité à répondre avantageusement à un besoin. Parmi les éléments en faveur des TPFL, il y a:

- Leurs bonnes propriétés physiques

- La longévité en entreposage de la matière non moulée et sa facilité de manutention.

Dans le cas de l'estampage des thermoplastiques, surtout avec les grades plus "économiques" en PP/verre, le marché visé est celui de l'automobile et l'avantage annoncé est la vitesse de production offrant des cadences proches de celles recherchées par ce secteur.

Par contre, pour ce qui est des autres types de TPFL, malgré toutes les applications et les avantages que font miroiter les promoteurs, les réalisations sont encore limitées. Les éléments qui ralentissent le développement sont:

- Les coûts, souvent élevés, des matrices à haute performance et l'aspect "critique" résultant des seuls secteurs pouvant se permettre des matériaux aussi coûteux.

- La "non-maîtrise" des méthodes de moulage et l'absence de technique et d'équipements éprouvés pour ces matériaux.

Bien qu'il semble acquis que ces matériaux ouvrent un vaste champ d'applications et qu'à plus ou moins long terme ils seront plus largement commercialisés, il est difficile de prévoir lesquels, parmi ceux en développement, atteindront la maturité.

En bref, les TPFL sont très intéressants mais leur position future sur le marché, demeure largement du domaine de la spéculation.

INDEX

INDEX

ACIDE DE LEWIS 120
ACP-2 151-153-155-175 @ 183
ACTP 151
AERONAUTIQUE 98-141-174-183
AEROSPATIALE 98-142
ALIPHATIQUE (EPOXY) 119
ALKYD 63-70
ALLYL 21-55
AMINE ALIPHATIQUE 120
AMINE AROMATIQUE 120
AMINOPLAST 21-56
ANALYSE THERMIQUE 113
ANHYDRIDE D'ACIDE 120
ARAMIDE 96-126-129
ASPECT COLLANT 111
AUTOCLAVE 91-92-93-109
AUTOMOBILE 24
AZDEL 150-151-153-155-157 @ 164
AZLOY 158
AZMET 158-164

BAGGING 93-97-180
BALSA 130
BIPHENOLE "A" 119
BISMALEIMIDE 89-95-121
BLEEDER 93-105-107
BMC 22-23-30-38-39-47-49-60-69-86
BORE 128
BORON 96
BOSSAGE 76
BREATHER 93-105-107
BROMINEES (EPOXY) 119

CALE D'ETANCHEITE 93-106
CARBONATE DE CALCIUM 27
CARBONE 96-127
CARROSSERIE 78
CAUL PLATE 93-101-106-107-133-178-179-182
CHAUFFAGE 54-180-185
CO-TISSAGE 154-177
COLD PRESS 25-26
CRISTALLINITE 167
CYCLOALIPHATIQUE (EPOXY) 119

DAIP 55-64
DAM 93-106-107
DAN 55
DAP 55-64
DEBULKING 144
DECOUPE 41-134
DEFAUTS DE MOULAGE 46
DEMOULAGE 23-54-74-77
DEMOULANT LIQUIDE 93-106
DEPOSITION POUDRE 154
DESIGN (REGLES) 73 @ 76-97-132 @ 142-163,73,83
DGEBA 119
DMC 60
DURCISSEURS 120
DURETE (TEST) 113

EBARBAGE 41
ECOULEMENT 80-82-83-147-186
ELECTRIQUE 24-76
EMISSION ACOUSTIQUE (TEST) 112
EPOXY 21-57-67-89-95-118-129
ESTAMPAGE 153-155-159-161-168-169-173
ETUVE 99-108

FEUTRE DE DRAINAGE 93-105
FIBEROD 151-153
FILM D'ARRACHAGE 93
FILM DE DEMOULAGE 93-105
FIT 151
FLASH BREAKER 106
FOUR 40-172
FLUAGE 111

GAZ INERTE	93
GELIFICATION	90-111
GFTP	151
GRAPHITE	96-127
HDPE LOFTED TYPE	158
HMC	62-86
HYBRIDE	154
HYDRO CLAVE	103
IMPREGNATION	154-177
IN-MOLD-COATING	41-42-85
INSERT	23-76-136-137
ISO. GMT. PA	158
ISO. GMT. PET	158
JOINTAGE	138
KEVLAR	96-126-129
LAMINAGE	89-92-94-143-144
LIGNE DE SOUDURE	43-48-73-82
LIQUID RELEASE AGENT	93
LOW-PROFILE	24-48
MACHINE SMC	38-39
MASTIQUE	93-106
MATCHED DIE MOLDING	27-28
MATURATION	81
MELAMINE	14-56-66
MEMBRANE FLEXIBLE	93-104-179
MgO	14-47-80
MODELISATION	80 @ 84
MOULAGE AUTOCLAVE	90-91-99-103

MOULAGE AZDEL 159 @ 161
MOULAGE COMPRESSION 15-16-25 @ 30-43 @ 49
MOULAGE CONTACT 89-97
MOULAGE ESTAMPAGE RYTON 168-169
MOULAGE PRESSE-CLAVE 178-179
MOULAGE TH. FORM RYTON 171
MOULES 19-50 @ 54-83-94-107-114-115 162-172-182
MOUSSE PVC 130

NCS 151
NERVURES 75
NID D'ABEILLES 130
NOVALAC (EPOXY) 119
NYLON 104

PALE D'HELICOPTERE 92-141
PARE-CHOC AUTOMOBILE 78
PASTILLEUSE 40
PATRON DE CHARGE 43-82
PEI 176
PEEK 152-175-179
PEEL PLY 93-105-107
PES 176
PETG 176
PHENOLIQUE 14-22-52-68-87-95-123
PI 176
PINCEMENT 16-18-19-25-26-27-44-54-83
PLAQUE DE COMPRESSION 93-106
POMPE A VIDE 93-108
POLYETHYLENE LINEAIRE 96
POLYESTER 22-25-59-95-123-148
POLYIMIDE 63-72-89-95-121-122
PRECHAUFFAGE 40
PREFORM 26
PREPREGS 89-94-110-111-117
PRESSE 18-31-36-84-162-172
PRESSE CLAVE 101-108-178 @ 182-187
PRESSION 20-35-36-109
PRESSURE BAG 89-100-101
PRESSURE SENSITIVE TAPE 93-106-107
PS 176
PVA 104

RADIOGRAPHIE (TEST) 112
REFROIDISSEMENT 48
RELEASE AGENT 107
RELEASE FABRIC 93-105
RELEASE FILM 93-105-106-107
RETASSURE 76

ROUE AUTOMOBILE 78
RUBAN ADHESIF 93-106
RYTON 151-153-155-158-165 @ 174

SANDWICH 92-97-139-140
SEALANT 92-106-107
SIEGES 78
SILICONE 63-71-104
SMC 14-16-22-23-27-38-39-44-47-61
69-78 @ 86
SPECTRA 96

TACK CONTROLE 111
TEMPERATURE 20-35-37-45
TEMPS 20-35-37
THERMOFORMAGE 153-155-170-171-172-173-187
TISSU D'ARRACHAGE 105
TISSUS PORREUX 93-105
TMC 62
TPFL 150-156-184-188
TRANSFERT 29-30-85
TRANSPORT 142
TRE 151-153

ULTRASON (TEST) 112
UREE 14-56-65

VACUUM BAG 93-97-98-99-100-104-107-178
VACUUM MOLDING 89
VERRE 96-124-125-129
VISCOSITE 43-47-80-81
VITESSE 20-35-36-45-82

XMC	62-84
ZMC	29-86-87